

Ville Kettunen

# Kartonkikonesalin CFD-simulointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

19.10.2016

Tekijä Otsikko	Ville Kettunen Kartonkikonesalin CFD-simulointi
Sivumäärä Aika	39 sivua + 7 liitettä 19.10.2016
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikan tutkinto-ohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	HVAC Desing Manager Juhani Suihkonen lehtori Sakari Lukkarinen
<p>Kartonkikoneen ilmanvaihto on vaativa prosessi. Energiankulutus on merkittävää, mutta muun prosessin lämmöntalteenotto vähentää kulutusta. Ilmanjako kartonkikonesaliin on tärkeää, ja CFD-simuloinnilla (Computational Fluid Dynamics, virtauslaskenta) tätä voitaisiin optimoida. Tässä työssä käytettiin Autodeskin CFD 2017 –ohjelmaa, joka sisälsi geometrian mallintamiseen työkalun Autodesk Simstudio Tools 2016 R2.</p> <p>Työn tarkoituksena oli tarkastella CFD-simuloinnilla kartonkikonesalin olosuhteita. Työssä käydään ensin lyhyesti läpi paperin ja kartonkin valmistusprosessi, mitä prosessitilan ilmanvaihtoon liittyy ja miten se toteutetaan. Näin halutaan antaa perusteet prosessista lukijalle, joka ei aikaisemmin ole tutustunut paperin ja kartonkin valmistusprosessiin. CFD-simuloinnin vaiheet käydään yksinkertaistettuna läpi, koska siihen liittyvä teoria on todella monimutkaista.</p> <p>CFD-simuloinnit aloitettiin testaamalla, toimiiko geometria halutulla tavalla. Kartonkikonesalin pohjakuvat olivat tiedossa, samoin salille laskettu kokonaistase. Näiden avulla rakennettiin geometrinen malli, joka simuloitiin CFD-ohjelmalla. Reunaehdot simulaatioille saatiin kokonaistaseesta. Simulaatioiden edetessä päädyttiin tekemään kolme erilaista skenaariota: normaalitilanne, tuloilman lämpötilan muuttaminen 20 °C:seen ja tuloilmalaitteiden paikkojen siirtäminen. Tärkein näistä simulaatioista saatu tulos on tuloilmanopeuden vaikutus kartonkikonesalin lämpötiloihin, varsinkin oleskeluvyöhykkeellä.</p> <p>CFD-simuloinnissa geometrian onnistunut mallintaminen, laskentahilan rakentaminen ja reunaehtojen määrittäminen vaikuttavat oleellisesti simulaatioiden onnistumiseen. Näihin taas auttaa virtausopin teorian tunteminen ja käytännön kokemus.</p> <p>Saatuja tuloksia ei päästy todentamaan mittauksilla, joten simulaatiot ovat puhtaasti teoreettisia.</p>	
Avainsanat	CFD, kartonkikonesali, Autodesk CFD 2017

Author Title	Ville Kettunen CFD simulation of cardboard machine hall
Number of Pages Date	39 pages + 7 appendices 19 October 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering
Instructors	Juhani Suihkonen, HVAC Desing Manager Sakari Lukkarinen, Principal Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to study the conditions of a cardboard machine hall with the help of CFD simulation (Computational Fluid Dynamics). The aim was to establish whether it is possible to optimize the air conditioning of the hall, a demanding process since the air distribution of the hall is important. The software that was used in this project was Autodesk CFD 2017 with the geometric modeling tool Autodesk Simstudio Tools 2016 R2. To ensure successful geometric modelling, mesh and boundary conditions, knowledge of fluid dynamics theory and practical experience was employed.</p> <p>The first CFD simulations were carried out to finalize the geometrical design chosen for the programme. The final three simulations consisted of three different scenarios. The most important result achieved was the effect of the supply air unit air speed on the temperatures in the area occupied by workers.</p> <p>The validation of results was not possible, so the simulations are purely theoretical.</p>	
Keywords	CFD, carboard machine hall, Autodesk CFD 2017

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Paperin ja kartongin valmistusprosessi	1
2.1	Paperikone	2
2.2	Kartonkikone	3
3	Paperikonesalin ilmanvaihto	4
3.1	Paperikoneen kuormat ja prosessipoistot	4
3.1.1	Viiraosa	5
3.1.2	Kuivatusosa	6
3.2	Konesalin ilmanvaihto	7
3.3	Mitoitus ja tase	8
3.4	Laitteet ja suunnittelutapoja	10
3.5	Lämmöntalteenotto eli LTO	11
4	Virtauslaskenta	14
4.1	Sisäilmaston mallintamisen työkalujen vertailua	14
4.2	Virtauslaskennan perusteet	16
4.2.1	Turbulenssimalli	17
4.3	Virtausmallinnuksen kulku	18
4.3.1	Geometria	18
4.3.2	Laskentaverkko	18
4.3.3	Reunaehdot	20
4.3.4	Simulointi, tulosten esittäminen ja validointi	21
4.3.5	CFD-simuloinnin laatu ja virheiden mahdollisuus	22
5	Simuloinnit ja ohjelmat	23
5.1	Autodesk CFD 2017	24
5.1.1	Geometria	24
5.1.2	Reunaehdot	25
5.1.3	Sisäiset reunaehdot	26
5.1.4	Laskentahila	26
5.1.5	Simulointi ja fysiikka	27
5.2	Geometrinen malli	27



6	Ensimmäiset simuloinnit	28
6.1	Simulointien aloittaminen	28
6.2	Testisarja 1	29
6.3	Testisarja 1:n tuloksia, analyyseja ja korjaavia toimenpiteitä	29
6.4	Testisarja 2	30
6.5	Testisarja 2:n tuloksia, analyyseja ja korjaavia toimenpiteitä	31
6.6	Testisarja 2:n lämpökuormasimulaatiot, tulokset ja analysointi	32
7	Lopulliset simuloinnit	33
7.1	Lämpökuormasimulointi	33
7.2	Tuloilman lämpötila 20 °C	35
7.3	Tuloilmalaitteiston muutokset	35
8	Yhteenveto	36
	Lähteet	39

#### Liitteet

Liite 1. Taselaskelma kartonkikonesalista ja asetukset Autodesk CFD 2017 -ohjelmalle

Liite 2. Testisarja 1 simuloinnin reunaehdoista ja kuvia tuloksista

Liite 3. Simulointien reunaehdot ja kuvia "Testi 2.26" -tuloksista

Liite 4. Lämpökuormasimulointi

Liite 5. Tuloilman lämpötila 20 °C

Liite 6. Tuloilmalaitteiston muutokset

Liite 7. Simuloinneissa eteen tulleet mietteet ja parannukset

## 1 Johdanto

Insinööriyön tilaajana on Pöyry Finland Oy. Pöyry Oy on vuonna 1958 perustettu konsultti- ja suunnitteluyritys.

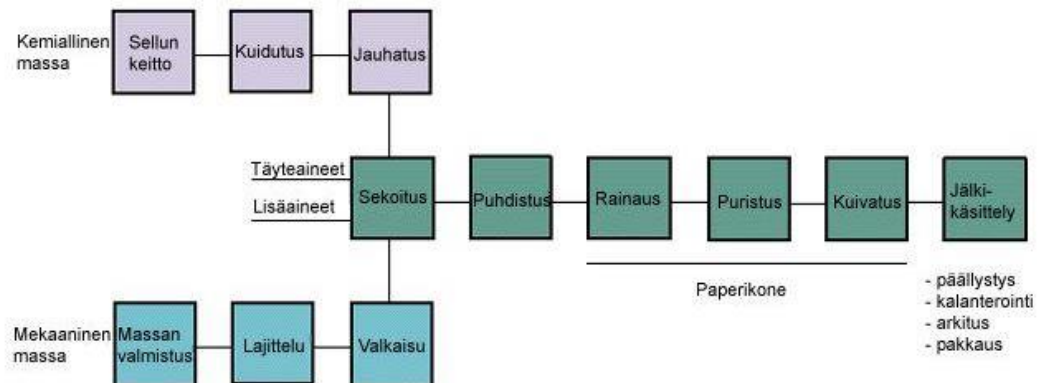
Työn tarkoituksena oli tarkastella CFD-simuloinnilla kartonkikonesalin olosuhteita. Kartonkikone luovuttaa huomattavan määrän lämpöä ja kosteutta saliin. Jotta olosuhteet pysyisivät prosessilaitteiden, rakenteiden, ja henkilökunnan kannalta siedettävänä, joudutaan saliin tuomaan paljon tuloilmaa. CFD-simuloinnilla pyritään tarkastelemaan teoreettisesti, miten tuloilmanmäärää ja -lämpötilaa muuttamalla voitaisiin parantaa salissa vallitsevia olosuhteita. Jos kartonkikonesalin mallintaminen ja simuloinnit onnistuisivat hyvin, voitaisiin tuloilman määrää vähentää. Tällä saavutettaisiin huomattavat säästöt energiankulutuksessa ja laitehankinnoissa.

Suurin osa koneen aiheuttamasta lämpö- ja kosteuskuormasta tulee viira- ja puristinosalta (eli märästä päästä). Kartonkikonesalista päätettiin mallintaa vain viira-, puristin ja kuivatusosa ja ”katkaista” sali heti kuivatusosan jälkeen. Koska kyseessä on suuri tila ja sinne aiheutuu isot kuormat, päätettiin geometrinen malli pitää yksinkertaisena.

## 2 Paperin ja kartongin valmistusprosessi

Paperin ja kartongin valmistusprosessi voidaan karkeasti jakaa seuraaviin osiin: massa- ja vesijärjestelmät, paperikone ja jälkikäsittely. Massa- ja vesijärjestelmien tarkoituksena on sekoittaa haluttu massakoostumus, riippuen siitä mitä ominaisuuksia paperiin tai kartonkiin halutaan. Paperi- tai kartonkikoneella massa levitetään tasaiseksi massarainaksi ja siitä poistetaan vettä erilaisilla menetelmillä. Lopuksi valmista paperia tai kartonkia käsitellään tarpeen mukaan, esimerkiksi kalanteroimalla, jossa sitä kiillotetaan telojen välissä. Kuvassa 1 on esitetty kaavio paperinvalmistusprosessista.

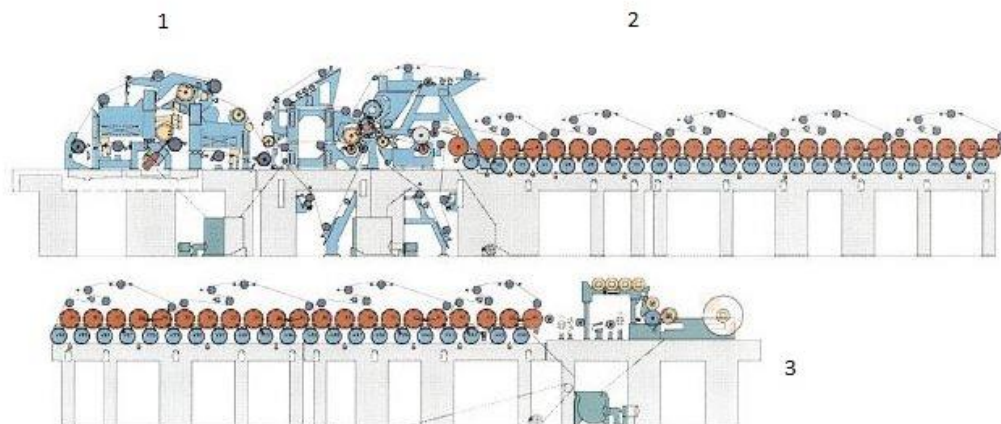
[1.]



Kuva 1. Kaavio puupitoisen painopaperin paperinvalmistusprosessista [1].

## 2.1 Paperikone

Paperikonesalissa on itse paperikone sekä mahdollisesti erilaisia jälkikäsittelylaitteita, ja näihin tai muuhun liittyvää tekniikkaa, kuten pumppuja tai puhaltimia. Yleensä pituusleikkuri ja pakkaamo sijaitsevat samassa konesalissa. Pituusleikkurilla leikataan koneen levyinen konerulla pienemmiksi asiakasrulliksi. Lisäksi paperikoneen perässä voi olla esimerkiksi online-kalanteri tai päällystyskone. Kalanterilla paperia kiillotetaan kahden telan välissä ja päällystyskoneella päällystetään haluttujen ominaisuuksien saamiseksi. [1.]



Kuva 2. Poikkiprofiilikuva SC-paperikoneesta (eli valmistaa superkalanteroitua paperia) [1.]

Paperikone voidaan jakaa kolmeen osaan: viira-, puristin- ja kuivatusosaan. Kuvasta 2 nähdään viira- ja kuivatusosa vasemmalla ylhäällä (1), keskellä kuivatusosa (2) ja oikealla alhaalla on konerullain (eli pope) (3). Kuivatusosa on katettu huvalla, eli se on eristetty salista. [1.]

Viiraosa koostuu perälaatikosta ja formeriosasta. Perälaatikon tehtävä on tuottaa tasainen massasuspensio (eli massaseos) koneen poikkisuunnassa viiralle. Formeriosalla tarkoitetaan perälaatikon jälkeistä osaa, jossa vettä poistetaan viiran läpi rainan molemmiin puolin tai yhdeltä puolelta (tasoviira). Tasoviiraja on nykyisin harvemmin käytössä, vettä poistetaan rainasta useammin kahdesta suunnasta. Tällä saavutetaan tasaisempi vedenpoisto ja näin ollen tasaisempi formaatio (eli tasaisempi pienimittakaavainen neliömassan vaihtelu). Kun märkä raina poistuu viiraosalta, sen kuiva-ainepitoisuus on noin 17–20 %. [1.]

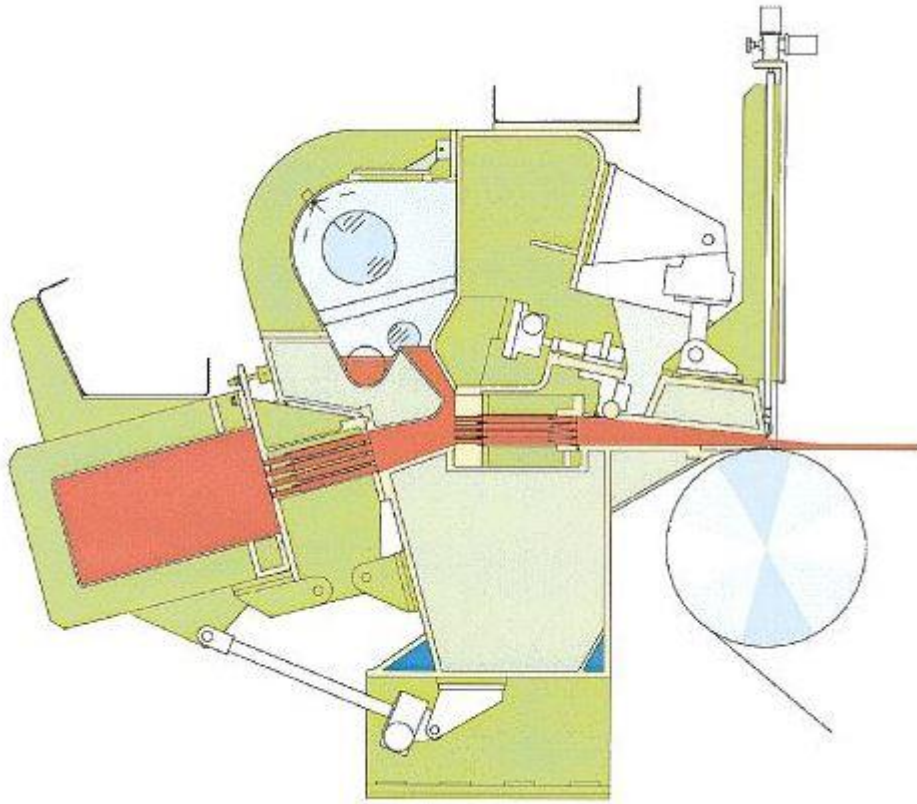
Puristinosan tehtävänä on poistaa rainasta mahdollisimman paljon vettä mekaanisen puristuksen avulla ja samalla tiivistää sitä. Puristus tapahtuu nipissä kahden puristinuovan tai vaihtoehtoisesti sileäntelan ja nuovan välissä. Puristinosan jälkeen kuiva-ainepitoisuus on 35–50 %. [1.]

Kun viira- ja puristinosalla on poistettu mekaanisin keinoin rainasta vettä noin 50 %, pitää loppu poistaa haihduttamalla. Tämä tapahtuu kuivatusosalla huvassa, joka on suljettu ympäristö. Kuivatus voi tapahtua kolmella eri tavalla: kontakti- eli sylinterikuivatuksella, puhalluskuivatuksella tai säteilykuivatuksella. Yhteistä kuivatusmenetelmille on se, että niiden avulla tuodaan energiaa massarainaan, joka haihduttaa vettä, ja haihtunut vesi poistetaan ilman avulla radan läheisyydestä. [1.]

## 2.2 Kartonkikone

Kartonkikoneen periaate on samanlainen kuin paperikoneellakin. Suurin osa kartonkilajeista on monikerroskartonkeja. Kerrostaminen voidaan tehdä liimaamalla valmiita kartonkirainoja yhteen tai yhdistämällä kerrokset jo viiraosalla ennen puristinosaa. Yhdistäminen viiraosalla voidaan tehdä kolmella tavalla. Ensimmäinen tapa on tehdä yhdistys yhdessä perälaatikossa, jolloin kerrokset ovat jo päällekkäin tullessaan viiralle. Kuvasta 3 nähdään Metson valmistama monikerrosperälaatikko. Toinen tapa on tuoda uusi raina perälaatikolla vanhan rainan päälle, esimerkiksi

tasoviiralle. Kolmas tapa on muodostaa jokainen kartonkin kerros omalla rainanmuodostusosalla ja yhdistää nämä ennen puristinosaa. [1.]



Kuva 3. Metson valmistama kartonkikoneen monikerrosperälaatikko SymFlo T [1]

### 3 Paperikonesalin ilmanvaihto

Paperi- ja kartonkikonesalissa on paljon erilaisia kosteus- ja lämmönlähteitä. Ne pyritään poistamaan mahdollisuuksien mukaan jo alkulähteillään prosessipoistoilla. Täydellisesti kuormia ei saada prosessipoistoilla poistettua, vaan ne pitää ottaa huomioon, kun suunnitellaan yleisilmanvaihtoa (eli sali-ilmanvaihtoa).

#### 3.1 Paperikoneen kuormat ja prosessipoistot

Suurin osa paperikoneen luovuttamasta lämmöstä ja kosteudesta saliin syntyy määrässä päässä, viira- ja puristinosalla. Kuivatusosa on suljettu huuvalla, ja sen tiiveys

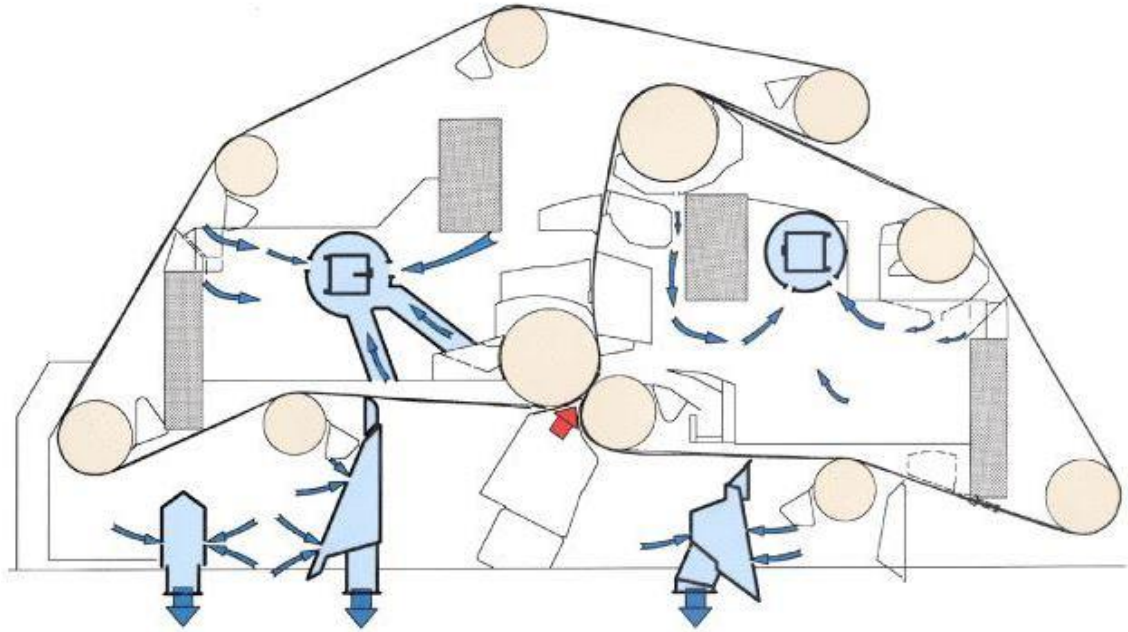
ja rakenne vaikuttavat oleellisesti siihen kuinka paljon se luovuttaa lämpöä saliin. Myös jälkikäsitteilylaitteet aiheuttavat kosteus- ja lämpökuormia saliin, esimerkiksi kalanterin kuumat telat kuivattavat paperia ja levittävät kosteutta. [2, s. 587–588.]

### 3.1.1 Viiraosa

Viiraosalla rainasta poistuva vesi sisältää myös kuituja ja muita pieniä partikkeleita. Jos likainen vesisumu pääsisi vapaasti leviämään saliin, se voisi muodostaa viiraosalla oleviin pintoihin kerääntymiä. Kun kerääntymät tippuvat rainalle, ne aiheuttavat ratakatkoja ja pahimmassa tapauksessa pitkän ajan kuluessa jopa konerikkoja. Lisäksi ympäristöön leviävä kosteus huonontaa työolosuhteita ja vaurioittaa sekä koneen rakenteita että rakennusta. [1.]

Likaisen vesisumun leviäminen tulisi estää mahdollisimman hyvin lähellä syntymäpaikkaansa. Formerissa tätä hallitaan vesivirtojen ja ilmavirtojen ohjauksella, viiraosan pintojen muotoilulla, mekaaniselle puhdistuksella (eli vesisuihkuilla) ja koteloinnilla. [1.]

Formerissa märkäviiraan imeytynyt vesi imetään pois joko suoraan telan kohdalta, esimerkiksi imutelalla, tai viiran ulko- ja sisälenkeissä, kuten kuvasta 4 nähdään. Viiralenkeissä on isoja imukanavia ja koneen alaosassa poikkisuuntaiset kanavat, joista ilma ja samalla vesisumu imetään pois. [1.]



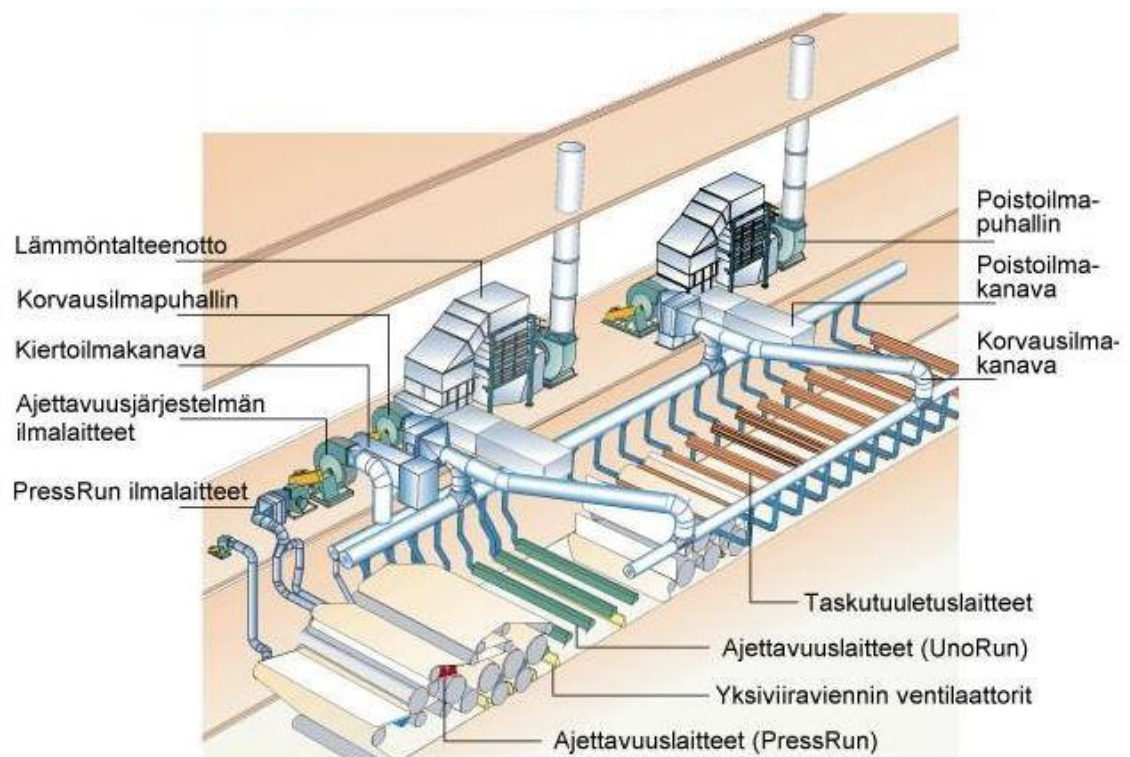
Kuva 4. SpeedFormer-prosessi-ilmastointi (Metso Oy) [1]

Viirassa on lisäksi pesusuihkut, joiden tarkoituksena on pitää viira puhtaana ja hyvässä kunnossa, ja niitä on useassa kohdassa formeria. Myös niistä aiheutuu iso kosteuskuorma vesisumun muodossa. Siksi pyritäänkin käyttämään koteloituja kaavareita, joissa suihkuvedet yritetään kerätä heti pois. [1.]

Yleensä viiraosalta poistettava ilma johdetaan pisaranerotin kautta suoraan ulos tai vaihtoehtoisesti lämmöntalteenoton kautta. Koska ilmassa on mukana myös kuituja ja muita partikkeleita, on pisaranerotin kyettävä erottelemaan myös niitä. Ilman erotinta katolle ja kanavistoon päätyvä vesi aiheuttaa ongelmia varsinkin talvella, ja myös epäpuhtaudet kerääntyvät kanaviin. [1.]

### 3.1.2 Kuivatusosa

Kuivatusosa on katettu huuvalle, joka mahdollistaa hallitut olosuhteet ja sen, ettei paperista haihtuva kosteus pääse suoraan konesaliin tai kellariin. Rainasta haihtunut vesi imetään huuvan yläosasta lämmöntalteenotto torniin (LTO-torni). Huuvaan pyritään tuomaan lämmitettyä korvausilmaa, mutta sinne tulee lisäksi vuotoilmaa pääasiassa kellarista, mutta myös konetasolta. Kuvassa 5 on esitetty kuivatusosan ilmajärjestelmiä. [1.]



Kuva 5. Kuivatusosan ilmajärjestelmät [1]

Huuvan aiheuttama lämpökuorma riippuu oleellisesti sen tiiveydestä ja U-arvosta. Hyvällä huuvalla se voi olla noin  $200 \text{ W/m}^2$  [2, s. 588].

### 3.2 Konesalin ilmanvaihto

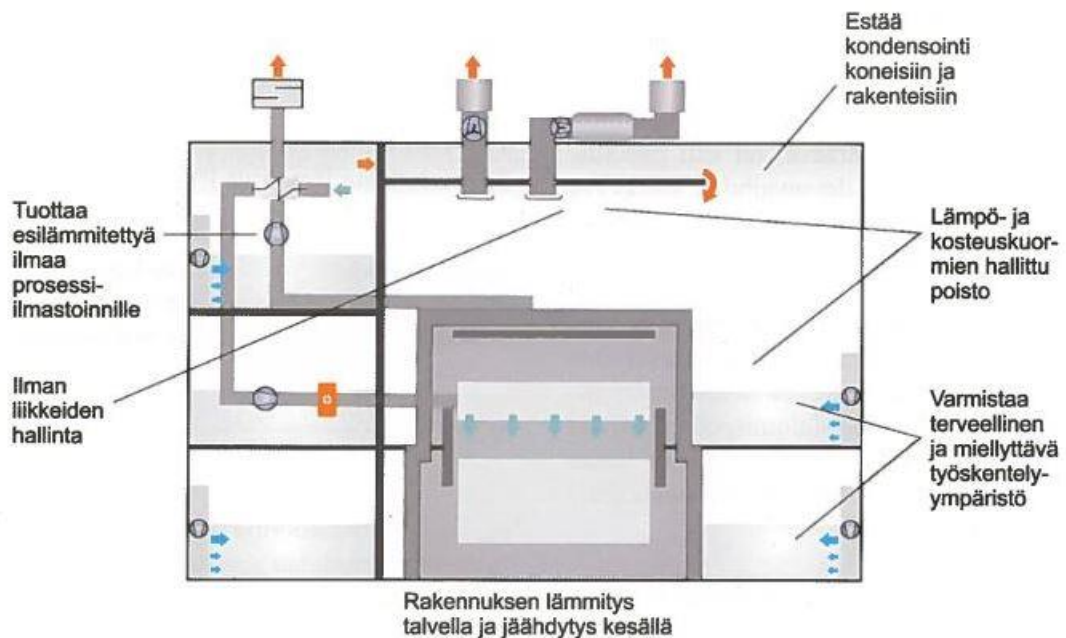
Vaikka prosessi-ilmastoinnilla pyritään poistamaan kosteus- ja lämpökuormat niiden alkulähteillä, niin aina kuormia leviää myös konesaliin. Lämpö- ja kosteuskuormat poistetaan hallitusti konesalin katosta poistoilmapuhaltimilla suoraan ulos. Tuloilma tuodaan konesaliin tuloilmayksiköillä, jotka puhaltavat ilmaa reikälevylamellien kautta. [2, s. 588–593.]

Paperikonesalissa tuloilmaa pyritään tuomaan enemmän kuivaan päähän kuin märkään ja poistamaan sitä märästä päästä. Tällä pyritään estämään märän pään kosteamman ilman leviäminen muualle saliin, ja varsinkin kuivaan päähän, jossa kosteus aiheuttaisi ongelmia jälkikäsittelyprosesseille. [3; 2, s. 588–593]



Talvella tuloilman tehtävänä on lämmittää konesalia. Tuloilman tuomisella kuivaan päähän saavutetaan lisäksi se etu, että ilma lämpenee ja kostuu ennekuin se saapuu märkään päähän. Näin ollen se ei aiheuta niin herkästi kondensaatiota seiniin, kattoon tai prosessilaitteisiin. [2, s. 588–593]

Paperikonesalin märän pään katossa oleva ilma ennen poistoilmakanavia on erittäin kosteaa ja lämmintä. Jotta kosteus ei rupeaisi kondensoitumaan kattopinnalle, pitää katto lämmittää. Tämä hoidetaan alas lasketun katon avulla ja kattohuuhelulla. Alas laskettuun kattoon puhalletaan lämmintä ilmaa (n. 55 °C), joka lämmittää salin puoleisen pinnan ja näin ollen estää kondensoitumista. [3; 2, s. 589.] Kuvassa 6 on havainnollistettu konesali-ilmastoinnin tehtävät.



Kuva 6. Konesali-ilmastoinnin tehtävät [2 s. 589].

### 3.3 Mitoitus ja tase

Lämpötila, kosteus ja virtausnopeus vaikuttavat oleellisesti työskentelyalueen viihtyvyyteen. Konesalin ilmanvaihtoa suunniteltaessa pitää tietää paperi- tai kartonkikoneen ja muiden salissa olevien laitteiden luovuttamat kosteus- ja lämpökuormat. Riippuen prosessista jommastakummasta tulee määräävä, ja sen mukaan lasketaan poistoilman minimi-ilmavirta. Tähän lisätään prosessin vaatima

poistoilmavirta (joka imetään salista), ja vuotoilmavirta. Tästä taseesta saadaan sali-ilmastoinnin vaatima tuloilmamäärä. Taulukossa 1 on esitetty paperikonesalin ilmatase.

Taulukko 1. Paperikonesalin ilmatase [2, s. 591].

Positio	Ilmavirta kg <sub>k,l</sub> /s			
	Kesä		Talvi	
	Sisään	Ulos	Sisään	Ulos
Huuvan poisto	–	110	–	110
Formerin ja puristimen poistot	–	140	–	140
Konesalin poisto	–	190	–	190
Tyhjöpuhaltimien poisto	–	40	–	40
Muut prosessin poistot	–	220	–	140
Konesalin tuloilma	580	–	580	–
LTO-tason ym. tuloilma	90	–	20	–
Vuotoilma	30	–	20	–
<b>Yhteensä</b>	<b>700</b>	<b>700</b>	<b>620</b>	<b>620</b>

Lämpökuormien poiskuljettamiseksi tarvittava ilmamäärä voidaan laskea kaavalla 1 ja kosteuden poiskuljettamiseksi kaavalla 2.

$$q_{mpi} = \frac{\phi}{c_p(T_{pi} - T_{ti})} = \frac{\phi}{c_p \Delta T_i} \quad (1)$$

$q_{mpi}$  on ilmamäärä [kg<sub>k,i</sub>/s]

$\phi$  on lämpökuorma [W]

$c_p$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg °C]

$T_{pi}$  on poistoilman lämpötila [°C]

$T_{ti}$  on tuloilman lämpötila [°C]

$$q_{mpi} = \frac{q_{mH_2O}}{x_{pi} - x_{ti}} = \frac{q_{mH_2O}}{\Delta x_i} \quad (2)$$

$q_{mpi}$  on ilmamäärä [ $kg_{k.i}/s$ ]

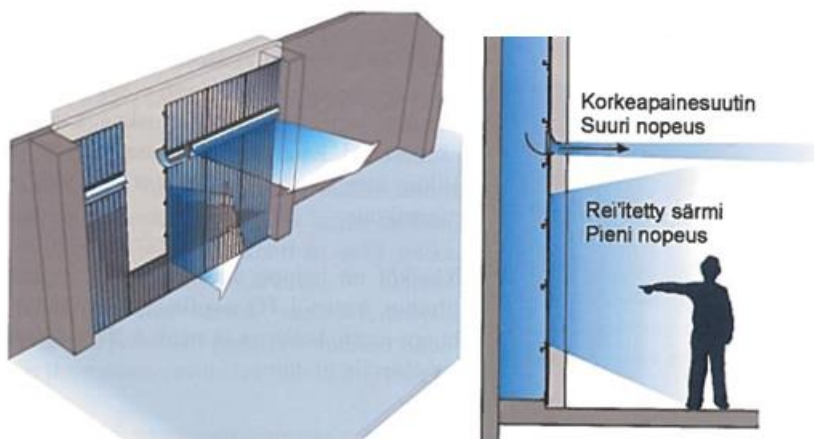
$q_{mH_2O}$  on kosteuskuorma [ $kg/s$ ]

$x_p$  on poistoilman absoluuttinen kosteus [ $kg H_2O/kg_{k.i}$ ]

$x_{ti}$  on tuloilman absoluuttinen kosteus [ $kg H_2O/kg_{k.i}$ ]

### 3.4 Laitteet ja suunnittelutapoja

Tuloilmayksiköissä on reikälevylamelli, jossa ulospuhallusnopeus on noin 1–1,2 m/s. Ne ovat yleensä modulaarisia, yhden pilarivälin levyisiä (esim. 6 900 mm). Koneisto voi olla seinälaitteistona tai vaihtoehtoisesti katolla. Niissä voi olla myös korkeapainesuutin (jet-suutin), jolla puhalletaan ilmaa kovalla nopeudella oleskeluvyöhykkeen yläpuolelle. Yleensä jet-suuttimet suunnataan koneen käyttöpuolelta märkään päähän päin. Niillä voidaan tehostaa syrjäyttävän ilmanvaihdon vaikutusta ja vähentää ilman virtausnopeutta työskentelyalueella. Kuvassa 7 on esitelty tuloilmayksikön idea, ja kuvassa 8 on seinälle sijoitettava tuloilmayksikkö. [3; 2, s. 592.]



Kuva 7. Seinälle sijoitettavan tuloilmayksikön puhallustavat [2, s. 592].

Poistoilma puhaltimet sijaitsevat yleensä paperikonesalin katolla. Sekä tuloilma- että poistoilmapuhaltimet ovat kooltaan isoja, niiden kapasiteetit ovat 5–40 m<sup>3</sup>/s. [3.]



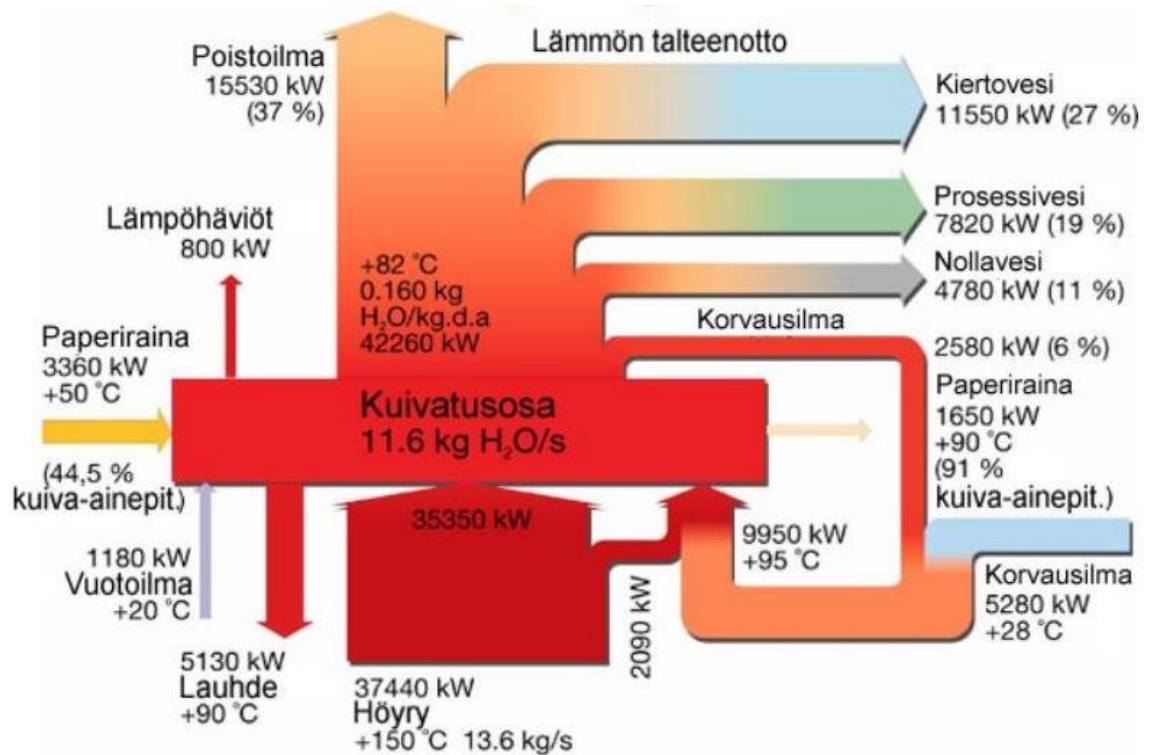
Kuva 8. Seinälle sijoitettava tuloilmayksikkö [2, s. 593]

Paperi- tai kartonkikonesalin ilmastointi perustuu syrjäytysilmanvaihtoon. Kone aiheuttaa nousevan ilmavirtauksen kohti kattoa. Salin lattiatasolle tuodaan viileää tuloilmaa pienellä nopeudella, joka poistetaan katon rajasta. Tiheyserosta johtuen kostea, lämmin ilma ei lähde valumaan alaspäin oleskeluvyöhykkeelle. Syrjäytysilmanvaihdossa ilma pyrkii asettumaan kerrokseen lämpötilan mukaan, viileä ilma lattiatasoon ja kuuma ilma kattoon. Jotta ilma pääsee liikkumaan kerroksesta toiseen, se vaatii ulkopuolista energiaa. Ja juuri lämmönlähteistä (varsinkin paperi- tai kartonkikoneesta) johtuva pystysuora lämmön siirtyminen (eli konvektio) tuo tarvittavaa energiaa ilman siirtämiseen. Tuloilman on oltava aina viileämpää kuin sali-ilman, muuten aiheutuu ”oikosulkuvirtaus” eli tuloilma ei virtaa tasaisesti saliin ja kerrostu, vaan nousee kohti kattoa. [2, s. 281–282.]

### 3.5 Lämmöntalteenotto eli LTO

Paperikoneessa suurin lämpöenergian kuluttaja on kuivatusosa. Kuvasta 9 nähdään erään paperikoneen kuivatusosan virtausdiagrammi. Suurin osa energiasta tuodaan höyrynä kuivatussylintereille, osa tulee kuivatus- ja vuotoilmana sekä paperiradan mukana. Osa poistoilman energiasta otetaan lämmöntalteenoton avulla prosessi- tai

kiertovesien lämmittämiseen sekä mahdollisesti konosalin tuuletusilman lämmittämiseen, ja osa sekoitetaan korvausilmaan ja kierrätetään takaisin huuvaan. Kuvasta 9 nähdään, että poistoilman osuus ohi LTO:n on kuitenkin huomattava. [1.]



Kuva 9. Sanomapaperilehtikoneen kuivatusosan energian virtausta ja ilmavirtoja kuvaava Sankey-diagrammi [1].

Lämmöntalteenotossa käytetään pääasiassa kolmea erilaista ratkaisua riippuen mihin lämpöä halutaan siirtää: ilma/ilma-, ilma/vesi-lämmönvaihdin tai suora kostea ilma/vesi-lämmönsiirrin (eli skrubberi). Ilma/ilma-lämmönsiirtimiä käytetään siirtämään energiaa ilmavirrasta toiseen. Nämä ovat levy- tai putkilämmönsiirtimiä. Pääasiassa näitä käytetään lämmittämään huuvaan korvausilmaa. [1.]

Ilma/vesilämmönsiirtimiä käytetään siirtämään energiaa ilmavirrasta vesivirtaan. Nämä ovat kenno- tai putkilämmönsiirtimiä. Näitä käytetään lämmittämään huuvaan poistoilmalla kierto- tai prosessivesiä. Myös likaista, kuitupitoista rainasta poistettua vettä (eli nollavettä) voidaan lämmittää, kunhan se otetaan huomioon lämmönsiirtimen suunnittelussa. [1.]



## 4 Virtauslaskenta

### 4.1 Sisäilmaston mallintamisen työkalujen vertailua

Sisäilmaston mallintamiseen on useita työkaluja, jotka pitää osata valita tarpeen mukaan. Ne lajitellaan aina sen mukaan, suoritetaanko laskenta tasapainotilanteessa vai aikariippuvaisena. Tasapainotilanteessa laskennan olosuhteet ja raja-arvot pysyvät vakioina, eivätkä riipu ajasta. Aikariippuvaisella laskennalla voidaan laskea esimerkiksi vuodenajasta riippuvia lämpötiloja sisätiloissa. [2, s. 383.] Nykyään on käytössä useita erilaisia ohjelmia eri käyttötarkoitukseen, esim. IDA Indoor Climate and Energy, jolla voidaan simuloida rakennuksen energiankulusta tai lämpötasetta [4].

Yksinkertaisempia tapauksia, kuten huonetilan epäpuhtauksia, saadaan ratkaistua riittävän tarkasti taulukkolaskennalla. Vaativammat simuloinnit, kuten huoneiden jäähdytystarpeen laskenta, vaatii jo ohjelmalta enemmän, ja kaikkein vaativimpiin virtaussimulointeihin käytetään CFD-ohjelmia, kuten Autodeskin CFD 2017 -ohjelmaa. Taulukossa 2 on eritelty eri menetelmien käyttökohteita ja periaatteita. [2, s. 383.]



Taulukko 2. Taulukkolaskennan, rakennussimuloinnin ja CFD-laskennan vertailua [2, s. 387].

	Yksi- ja monivöhykelaskenta (taulukkolaskenta ja vastaava)	Rakennussimulointi	Virtauslaskenta / CFD
Tyypilliset käyttökohteet	Laskentaperiaatteiden ja mallintamisen opiskelu. Yksinkertaiset ja yksinkertaistetut tapaukset. Laboratorio- ja merkkiainemittausten simulointi.	Rakennusten lämmitys- ja jäähdytystehontarpeen sekä energiantarpeen laskenta. Ilmastoinnin järjestelmävalitsohtojen vertailu. Aurinkosuojausten vertailu.	Huoneen lämpötilan, pitoisuuden ja kosteuden laskenta pienissä lokeroissa, "hilan kopeissa" ja siten jakauman määrittäminen. Virtauslementtien ja huoneen virtausten mallintaminen.
Ohjelmistot ja koneet	Yleensä tavanomaiset taulukkolaskentaohjelmat ja koneet.	Tarkoitukseen kehitetyt laajat ja suhteellisen edulliset ohjelmistot. Koneet tavanomaista tehokkaammat.	Tarkoitukseen kehitetyt laajat ja kalliit ohjelmistot. Koneet huomattavasti tavanomaista tehokkaammat.
Aikariippuvuus	Tasapaino- tai aikariippuva tilanne.	Aikariippuva tilanne.	Yleensä tasapainotilanne, mutta voi olla myös aikariippuva tilanne.
Mallinnusperiaate	Massatase ja lämpövirrat vyöhykkeiden välillä	Massatase ja lämpövirrat vyöhykkeiden välillä	Virtaukseen vaikuttavia voimia kuvaava liikemääräyhtälö mukana, mallinnetaan tilan sisäinen virtauskenttä.
Huonetilan olosuhteet	Kussakin huonetilassa tai vyöhykkeessä on yksi lämpötila, pitoisuus ja kosteus.	Kussakin huonetilassa tai vyöhykkeessä on yksi lämpötila, pitoisuus ja kosteus.	Olosuhteet mallinnetaan huonetilan joka paikassa.
Ulkopuolen olosuhteet	Lämpötila, pitoisuus ja kosteus helppo mallintaa, mutta aurinkokuorman mallinnus työlästä.	Aurinkokuorman simulointiin panostettu erityisesti.	Reunaehdot lasketaan usein esim. rakennussimuloinnilla tai taulukkolaskennalla.
Sisäiset lähteet	Yksivöhykelaskennassa kuormitus tulee kyseiseen vyöhykkeeseen. Konvektiovirtaukset mallinnetaan korkeussuunnassa eri vyöhykkeille, jos kaksi tai useampia vyöhykkeitä.	Lämmönlvovutus jaetaan säteilyyn ja konvektioon. Säteily eri pintoihin lasketaan näkyvyyskertoimien mukaan.	Lämpökuormat määritellään pintakohtaisesti joko lämpötiloina tai -virtoina.
Seinämät	Lämmönsiirtoa seinämissä ei yleensä mallinneta, on kuitenkin mahdollista.	Lämmönsiirtoon seinämissä panostettu erityisesti.	Reunaehdot lasketaan usein esim. rakennussimuloinnilla tai taulukkolaskennalla.
Seinämien pinnat	Seinämän pinnan lämmönsiirtokerroin oletetaan yleensä vakioksi. Mahdollisesti seinien keskinäinen säteilylämmönsiirto lasketaan.	Seinämän pinnan lämmönsiirtokerroin oletetaan yleensä vakioksi. Mahdollisesti seinien keskinäinen säteilylämmönsiirto lasketaan.	Reunaehdot lasketaan usein esim. rakennussimuloinnilla tai taulukkolaskennalla. Lämpösäteily lasketaan säteilymallilla tai etukäteen reunaehtojen laskennan yhteydessä.
Ikkunat	Useimmiten läpi tuleva lyhytaaltoinen säteily ja pinnasta tuleva pitkäaaltainen säteily ja konvektio yksinkertaistetaan huomattavasti.	Aurinkokuorman simulointiin ja lämmönsiirtoon seinämissä panostettu erityisesti.	Reunaehdot lasketaan usein esim. rakennussimuloinnilla tai taulukkolaskennalla. Konvektiovirtaukset pinnassa lasketaan.
Tuloilma ja poistoilma	Ilmavirta ja lämpötila voivat muuttua ajan mukana.	Ilmavirta ja lämpötila mallinnetaan aikariippuvana.	Tuloilmalaitteiden ilmasuihkun reunaehtoihin on monia mallinnustapoja. Ilmasuihkun liikemäärä on tärkeä reunaehto.
Tilassa olevat jäähdytys-, lämmitys- ja suodatuslaitteet	Vyöhykkeittäin	Yleensä yhdessä vyöhykkeessä.	Mallinnetaan tiettyyn paikkaan.

Virtauslaskennasta käytetään englanninkielistä nimitystä CFD-simulaatio, joka tulee sanoista Computational Fluid Dynamics. Virtauslaskentaa on käytetty huonevirtauksien



mallintamiseen jo vuosikymmeniä, mutta 2000-luvulla tehokkaammat tietokoneet ja kehittyneemmät ohjelmistot mahdollistavat käytön isoihin kohteisiin ja aikariippuviin virtausilmiöihin. [2, s.402.]

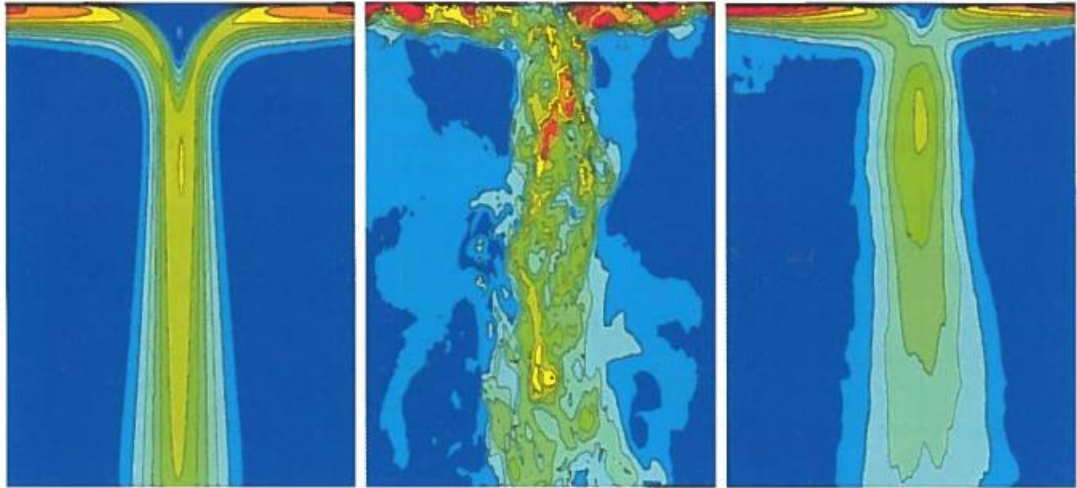
#### 4.2 Virtauslaskennan perusteet

Virtauslaskennassa selvitetään kuinka nesteet ja kaasut liikkuvat kiinteiden kappaleiden ympärillä ja sisällä [5]. Virtauslaskenta perustuu Navier–Stokes yhtälöiden ratkaisemiseen. Tärkein yhtälö on virtaukseen vaikuttavia voimia kuvaava liikemääräyhtälö, ja yhtälöpareista ratkaistaan tarpeen mukaan myös muita yhtälöitä. Vaikka periaatteessa näin saadaan tarkka malli tilan virtauksista, käytännössä laskentaa varten tehdyt yksinkertaistukset aiheuttavat virhettä laskentaan. [2, s. 402–403.]

Yleensä virtauslaskenta tehdään aikakeskiarvotettuna Navier–Stokes-laskennalla (RANS, Reynolds Averaged Navier Stokes). Siinä simuloidaan päävirtaukset ja pyörteet mallinnetaan turbulenssimalleilla. Turbulenttisen virtauksen sisältämien mikropyörteiden mallintaminen tarkasti vaatisi ajasta riippuvaista laskentaa ja olisi liian raskasta, varsinkin isolla mittakaavalla [2, s. 403.]

Aikakeskiarvotettu RANS-laskenta perustuu tasapainotilanteeseen. Esimerkkinä ovat paperin ja kartongin valmistus, joka on jatkuva prosessi, ja ajon aikana salissa vaikuttavat suureet ovat vakioita. Näin ollen voidaan hyvin käyttää tasapainotilanteeseen perustuvaa laskentaa.

Virtauksen aikariippuvuutta voidaan kuvata LES-mallinnuksella (Large Eddy Simulation). Tällöin virtausta ei keskiarvoteta ajan vaan paikan suhteen, ja sillä saadaan näkyviin tarkemmin miltä virtaus todellisuudessa näyttää. Kuvassa 11 on esimerkkinä kahden katossa olevan virtauksen kohtaaminen aikakeskiarvotetussa RANS-mallinnuksessa ja aikariippuvaisessa LES-mallinnuksessa. [2, s. 404.]



Kuva 11. Kohtaavien ilmavirtojen nopeusjakaumat. Vasemmalla aikakeskiarvotettu RANS, keskellä aikariippuva LES-mallinnus hetkellisesti ja oikealla LES-mallinnuksen aikakeskiarvo. [2, s. 404.]

#### 4.2.1 Turbulenssimalli

Turbulenssimalleilla kuvataan virtauksen pyörteitä, ja tämä yksinkertaistaa laskentaa. Samalla tosin häviää turbulenttisten virtausten mikrorakenteen tieto- ja aikariippuvuus. [2, s. 404; 7, s. 14.]

Turbulenssimalleja on käytössä useita, ja oikean valitseminen on tärkeää lopputuloksen kannalta. Yleisemmin käytetty on  $k$ - $\epsilon$ -turbulenssimalli, jossa on yhtälöt sekä kineettiselle energialle ( $k$ ) että sen häviämiselle ( $\epsilon$ ). Muita malleja on mm. erilaiset SST  $k$ - $\omega$  -mallit tai RNG-malli. Koska mallit ovat yksinkertaistuksia monimutkaisista pyörteistä, ei yleispätevää mallia ole, vaan eri mallit voivat antaa samasta tilanteesta hyvinkin erilaisia tuloksia. [2, s. 404.]

Sekä Navier–Stokesin-yhtälöitä että erilaisia turbulenssimalleja on käsitelty lukuisissa eri lähteissä. Tässä insinööriyössä ei avata Navier–Stokesin-yhtälöryhmiä sen tarkemmin, mutta lisätietoa on saatavilla Nielsenin [7] ja Goodfellowin & Tähden [6] julkaisuista.

### 4.3 Virtausmallinnuksen kulku

#### 4.3.1 Geometria

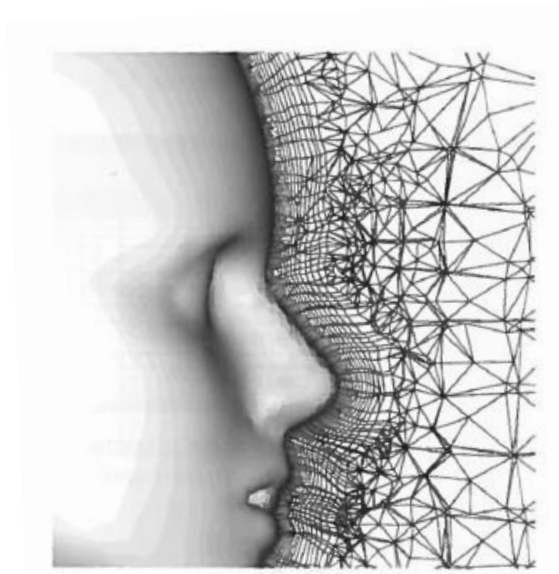
CFD-laskennan ensimmäinen käytännön askel on mallintaa geometria. Se voidaan joko tehdä itse alusta alkaen tai tuoda se CAD- tai muista soveltuvista malleista. Valmiiden mallien ongelmana ovat yleensä laskennan kannalta turhat yksityiskohdat. Esimerkiksi tuloilmasäleikön jokaista ritalää ja koloa ei ole järkevää mallintaa kokonaan, mikäli tutkitaan ison huonetilan ilmavirtauksia. Joskus onkin helpompaa luoda geometria alusta alkaen, kuin ruveta yksinkertaistamaan monimutkaista valmista mallia. [6, s. 1035; 2, s. 405.]

Mallia yksinkertaistaessa pitää olla tarkkana, ettei poista laskennan kannalta oleellisia osia. Esimerkiksi huonetilan virtauksia mallintaessa pitää pylväät, valaisimet, huonekalut tai muut virtauksia häiritsevät tekijät lisätä tai jättää myös geometriaan. Kaikki turha, kuten kiinteiden kappaleiden sisällä olevat kolot, lisäävät turhaan laskennan monimutkaisuutta. [6, s. 1036; 2, s. 405.]

#### 4.3.2 Laskentaverkko

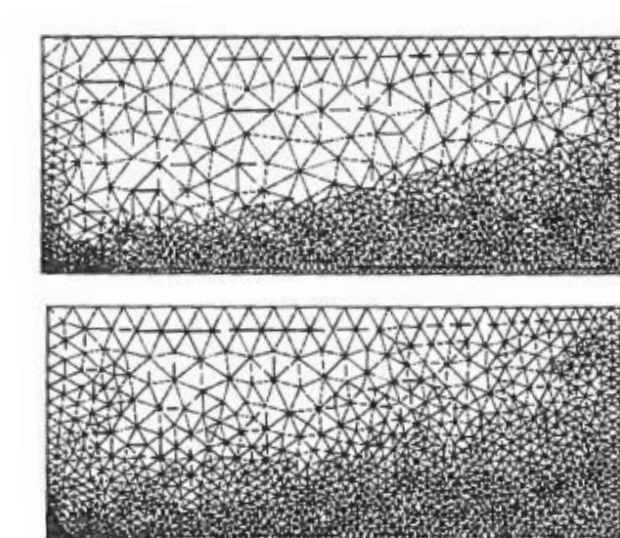
Laskentaverkkoja tai hilarakenteita on kahta tyyppiä: rakenteellinen ja rakenteeton. Rakenteellinen perustyyppi koostuu kuusisivuisista kuutioista. Rakenteelliset verkot sopivat hyvin tyhjän huoneen virtauksien mallintamiseen tai laminaarisille virtauksille, esimerkiksi tuulitunneli simulointeihin. [2, s. 405–406; 6, s. 1041.]

Koska huonevirtaukset ovat normaalisti turbulenttisia, sopii rakenteeton verkko paremmin niiden mallintamiseen. Rakenteeton verkko koostuu kolmiomallisista laskentakopeista. Pintojen lähellä verkkoa pitää tihentää, jotta laskenta tarkentuu ja samoin myös lämmönsiirtopintojen lähellä johtuen nopeuserojen kasvusta. Kolmiomallisen rakenteettoman verkon tihennys tehdään prismaelementeillä. Kuvassa 12 on ihmisen ihon läheisyydessä tehty tihennys, jossa näkyvät prismakopit ja kolmionmalliset rakenteettomat laskentakopit. [2, s. 406; 6, s. 1040; 7, s. 28.]



Kuva 12. Rakenteettoman verkon tihennys [7, s. 28].

Laskentahilan muodostuksessa voidaan käyttää sopeutuvaa verkonmuodostusta, joka muuttaa verkkoa tarpeen mukaan. Pintojen lähelle voidaan tehdä tiheämpi verkko, jos esimerkiksi nopeuserot sitä vaativat. Verkkoa voidaan tihentää nopeuden tai muun suureen mukaan iterointien perusteella. Laskentahiloja voidaan tihentää tilavuuden perusteella, jolloin vältetään liian suurien tai pienien laskentahilojen kosketus. Kuvassa 13 on esimerkki tilavuuden mukaan sopeutuvasta verkosta. [7, s. 28.]



Kuva 13. Tilavuuden mukaan sopeutuva verkko alemassa kuvassa [7, s. 28].

Periaatteessa laskentahila ei voi olla liian tiheä, mutta yleensä koneteho rajoittaa tiheyttä. Laskentahilojen riittävä määrä normaalissa RANS-laskennassa, jossa seinien lähellä on tihennetty verkko (wall functions), voidaan laskea kaavalla 3, ja onkin suositeltavaa käyttää vähintään siitä saatavaa hilojen määrää. Mikäli simulaatio suoritettaisiin aikariippuvaisella laskennalla, pitäisi kaavasta saatava hilojen määrä kertoa 100. [7, s. 48.]

$$N = 44,4 * 10^3 * V^{0,38} \quad (3)$$

*N on laskentahilojen lukumäärä*

*V on huoneen tilavuus [m<sup>3</sup>]*

#### 4.3.3 Reunaehdot

Reunaehdoilla määritellään simulaatioille rajat ja fysiikka. Niiden oikea ja realistinen määrittäminen on oleellista simulaatioiden onnistumisen kannalta. Simulointien valmisteluissa varsinkin reunaehto- ja reunaehtojen määrittämisessä auttaa virtausteorian tunteminen, ja käytännön kokemukset. Normaalissa huonetilan virtauksessa on otettava huomioon ainakin seuraavat reunaehdot: tuloilma, poistoilma, lämmönlähteet ja mahdolliset pitoisuudet. Tuloilman, poistoilman ja lämmönlähteiden lähellä pitää tihentää laskentaverkkoa, jotta niiden aiheuttamat muutokset virtauskenttään saadaan mallinnettua oikein. [2, s. 406-408.]

Tuloilmalaitteet vaikuttava oleellisesti tilan virtauskuvioiden syntyyn. Tuloilmalaitteiden reunaehtoina voidaan määrittää ilmavirran suunta, nopeus, massavirta, tilavuusvirta, lämpötila tai turbulentsisuus. Tuloilmalaitteet aiheuttavat ilmavirran kiinnittymistä kattopintaan ja pyörteitä, jotka pitäisi saada mallinnettua oikein. Yleensä tuloilmalaitteet yksinkertaistetaan simulointeihin, muuten niiden monimutkaisuus vaikuttaa laskentaverkkoon ja laskenta-aikaan. [2, s. 406–407.]

Huonemallinnuksessa on yleensä lämmönlähteitä, joiden reunaehdot voidaan määrittää pintojen lämpötiloina tai lämpötehoina. Tilassa olevat lämmönlähteet vapauttavat lämpöenergian konvektiona ja lämpösäteilynä. Konvektio aiheuttaa pluumeja eli lämmöstä johtuvia virtauksia, jotka vaikuttavat suoraan virtauskenttään.

Lämpösäteily taas jakautuu näkyvissä oleville pinnoille, josta se luovuttaa energiaa huonetilaan tai vapautuu ulos laskennasta. [2, s. 407.]

Epäpuhtaudet, kuten pienet hiukkaset, voidaan olettaa passiivisiksi kappaleiksi, jotka eivät vaikuta virtauskenttään vaan kulkeutuvat ilmavirran mukana. Jos halutaan esimerkiksi tarkastella isompien kappaleiden laskeutumista pinnoille, ne pitää mallintaa erikseen. [2, s. 407–408.] Myös esimerkiksi kosteuden kondensoitumista pinnoille voidaan simuloida, mistä on hyötyä varsinkin teollisuusympäristöissä [8].

#### 4.3.4 Simulointi, tulosten esittäminen ja validointi

Simuloinnin kestoon vaikuttaa oleellisesti miten monimutkainen ja tiheä laskentaverkko on, miten isosta tilasta on kyse, suoritetaanko laskenta aikariippuvaisena vai tasapainotilanteessa ja joudutaanko simuloimaan ilmavirtojen liikkeiden lisäksi lämpötilaa, kosteutta tai epäpuhtauksia. Myös käytettävissä oleva koneteho vaikuttaa simuloinnin kestoon. Koneteho vaikuttaa myös simuloinnin onnistumiseen varsinkin isoissa tiloissa, koska laskentahilojen määrä pitää nostaa tarpeeksi suureksi simuloinnin tarkkuuden parantamiseksi, ja näin ollen myös laskettavaa tulee moninkertainen määrä. [2, s.405.] Yleensä simuloinnit pyritään tekemään niin, että kone selviytyy niistä vuorokaudessa.

Mallinnustuloksia tarkastellaan ohjelmista löytyvillä työkaluilla, joilla voidaan esittää esimerkiksi lämpötila-, nopeus, pitoisuus- tai viipymäkuvia. Kuviin voidaan liittää myös vektoreita, jotka kuvaavat liikkeen suuntaa. [2, s. 405, 408.]

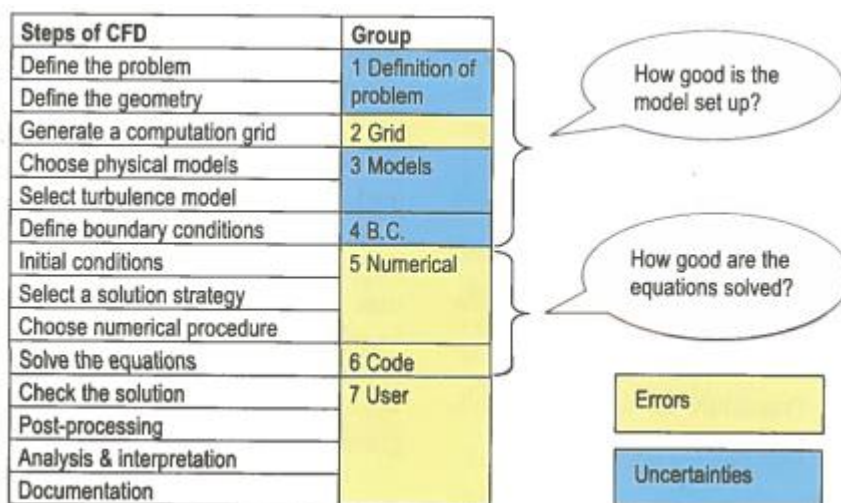
CFD-simuloinnit ovat aina yksilöllisiä, eikä yleisesti voida sanoa kuinka tarkkoja tai kuinka iso virheprosentti simuloinneissa on. Joskus tulokset voidaan saada jopa 5 prosentin sisään oikeista arvoista, mutta se vaatii onnistunutta geometrian mallintamista, ja oikein määriteltäviä reunaehdoja. [6, s. 1031.] Koska simuloinnit ovat teoreettisia, tulosten validointi auttaa virheprosentin arvioinnissa, esimerkiksi tuloilmalaitteiden reunaehdot voidaan määrittää savukokein. [2, s. 405]

CFD-simulointien onnistumisen kannalta on tärkeä pitää kaksi sääntöä mielessä: ”Simuloinnin lopputulos on vain niin hyvä kuin siihen syötetyt lähtöarvot” ja ”Laskentamalli on pätevä vain niissä rajoissa, mille validointi on tehty” [6, s. 1027].

Mikäli simulointeja ei päästä validoimaan, ne ovat puhtaasti teoreettisia, ja voivat antaa vain suuntaa oikean elämän virtauksille.

#### 4.3.5 CFD-simuloinnin laatu ja virheiden mahdollisuus

CFD-simulaatio on pitkä ja monimutkainen prosessi, joka koostuu monesta eri vaiheesta. Jokaisessa vaiheessa on monia eri syitä, minkä takia simulaatio voi epäonnistua tai johtaa virheellisiin tuloksiin. Virhelähteet voidaan jaotella seitsemään ryhmään: virtausongelman määrittely, laskentaverkko, laskenta mallit, reunaehdot, matemaattiset mallit ja virheet koodissa tai käyttäjässä. Kuvassa 14 on esitelty CFD-simuloinnin vaiheet, ja seitsemän virheryhmää. Kuvaan 14 merkatut epävarmuudet (sininen, nro 1, 3 ja 4) johtuvat joko puutteellisista tiedoista (kuten väärän turbulenssimallin käytöstä) tai tiedostamattomista tai vääristä reunaehdoista. Kuvan 14 virheet (keltainen, nro 2, 5, 6 ja 7) voidaan taas välttää huolellisuudella simuloinnin valmistelussa. [7, s. 41–42.]



Kuva 14. CFD-simuloinnin virheiden tarkastuslista [7, s. 41].

Kuvassa 15 on esitelty tarkastuslista, jonka mukaan voidaan edetä, kun arvioidaan CFD-simuloinnin laatua. Aina kun ruvetaan tekemään CFD-simulointia uudesta tilanteesta, pitäisi ongelmaa selvittää vähintäänkin kuvassa 15 esiintyvien neuvojen mukaan. [7, s. 60.] Esimerkkinä CFD-simuloinnin monista virheistä voidaan ottaa stabiili RANS-simulaatio, joka yliarvioi maksiminopeuksia. Tämä johtuu turbulenssimallien käytöstä ja virtauskentän aikariippuvuuden puuttumisesta. [2, s. 404.]

Topic	Subtopic	Checks, advices
1. Definition of problem	Simulation method • Simplification • Step-by-step approach	Choose proper approach (2D/3D, steady/transient) • Choose proper solution domain (depends on question) • From coarse model to fine model
2. Grid	Number of cells • Distribution • Cell quality	Hexahedral cells are better than tetrahedral cells • <i>Example for simple room problem (5 m x 5 m x 3 m):</i> $30^3 = 30k \Rightarrow$ <b>coarse case</b> , $60^3 = 200k \Rightarrow$ <b>medium case</b> , $100^3 = 1M \Rightarrow$ <b>fine case</b> (typically enough), $200^3 = 8M \Rightarrow$ <b>very fine case</b>
3. Models	Buoyancy • Turbulence model • Wall treatment • Radiation	Boussinesq or variable density, check direction of gravity • SST model best choice of 2-eq models for indoor airflow • Wall functions, low Re-number wall treatment • Discrete ordinate, or surface-surface
4. Boundary conditions	Wall temperatures • Air supply parameters • Symmetry plane • Wind situation	Check assumptions (obtained from BEPS, building energy performance simulation) • Realistic, validated? • Hides asymmetric phenomena • Boundary layer profile, check domain extent (typically 10-100 times building size)
5. Numerical	Discretization scheme	2 <sup>nd</sup> order
6. Code		Latest version, updates, user forums
7. User errors		Training, experience, ask experts
8. Documentation		Full internal documentation of parameters • Readable scale, usually always the same

Kuva 15. CFD-simuloinnin laadun tarkastuslista [7, s. 60].

## 5 Simuloinnit ja ohjelmat

Simulointien tekeminen aloitettiin tutustumalla käytössä olevaan ohjelmaan, eli Autodesk CFD 2017, ja rakentamalla geometrasta mallia. Tämän jälkeen tehtiin perustason simulointeja, joita ruvettiin tarkentamaan analysointien perusteella. Tämän tutkielman tekstiosiossa käydään osittain simulointien tuloksia läpi sekä simulointien ja laskennan kannalta aiheutuvia vakavia virheitä. Liitteissä on esitetty reunaehdoja ja saatuja tuloksia. Simulointien suuresta määrästä johtuen kaikkea ei voida esittää, vaan tähän on valittu tuloksien kannalta oleellisemmat.

Simuloinneista pyrittiin keräämään talteen työn kannalta oleellinen tieto. Lisäksi tutkittiin simulointeihin menevää aikaa.

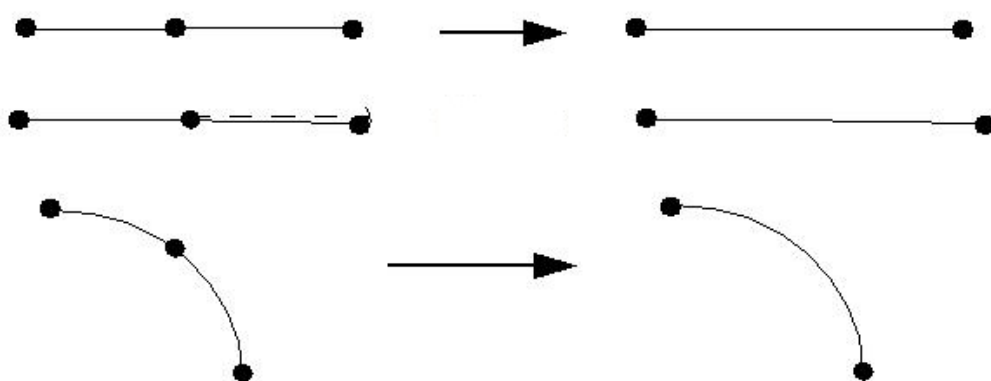
Koska työn suorittamiseen oli käytössä rajallinen aika, simuloinnit päätettiin tehdä kartonkikonesalin viira-, puristin- ja kuivatusosasta. Viira- ja puristinosalta aiheutuu saliin suurimmat kosteus- ja lämpökuormat. Sali leikattiin poikki kuivatusosan jälkeen niin, että huuva on kokonaisuudessaan mukana laskelmassa.



## 5.1 Autodesk CFD 2017

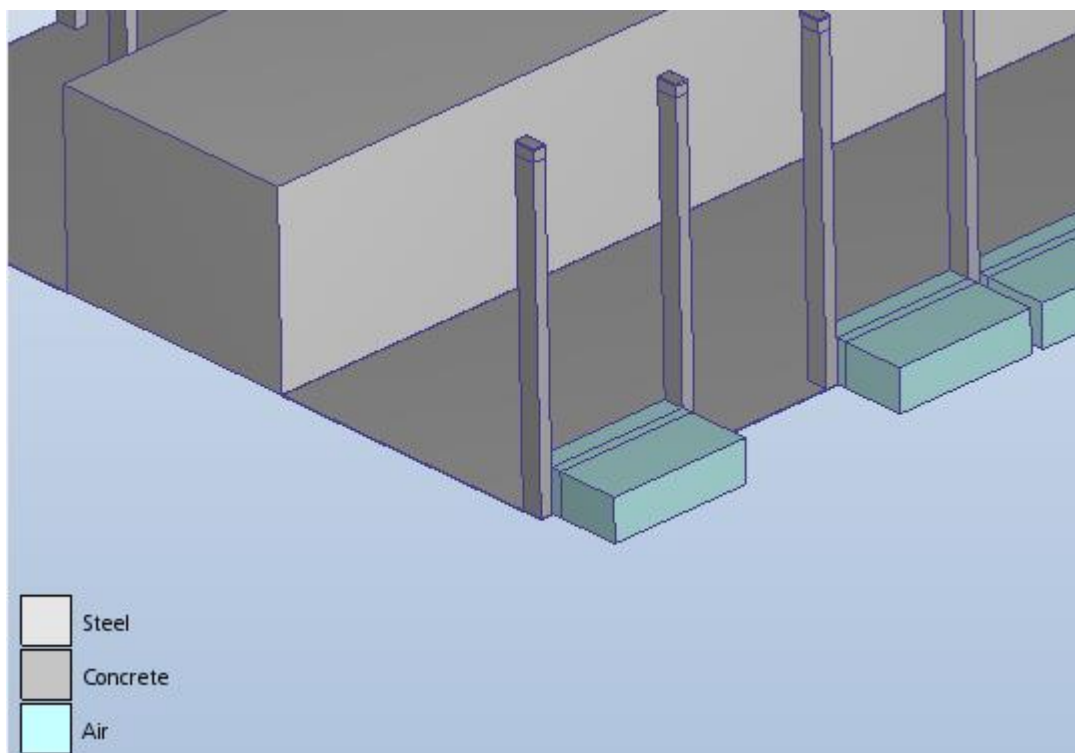
### 5.1.1 Geometria

Geometria tehdään Autodesk CFD 2017 -ohjelmistoon sisältyvällä geometrian rakennustyökalulla, Simstudio Tools 2016 R2, josta voidaan suoraan käynnistää CFD-simulointi. CFD-ohjelmassa on automaattisia geometrian korjaustyökaluja, joista tässä työssä käytettiin yhtä: edge merging. Sillä yhdistettiin alle 5°:seen taivutettujen vektoreiden kulmat. Kuvassa 16 on esitelty, mitä työkalu tekee.



Kuva 16. Edge Merging -työkalu [8].

Korjauksien jälkeen Autodesk CFD 2017 -ohjelmassa valitaan geometriassa oleville objekteille materiaali. Ohjelmassa on kaksi päämateriaali luokkaa: kiinteät ja fluidit. Ohjelmassa on kattava kirjasto eri materiaaleille, joiden ominaisuuksia voidaan myös tarpeen mukaan muokata. Kun materiaalit on valittu, ne näkyvät ohjelmassa eri väreillä, kuten kuvasta 17 nähdään. Kuvassa keskellä oleva laatikko esittää kartonkikonetta (terästä), palkit ja lattia ovat betonia ja tuloilmakanavat ilmaa. [8.]

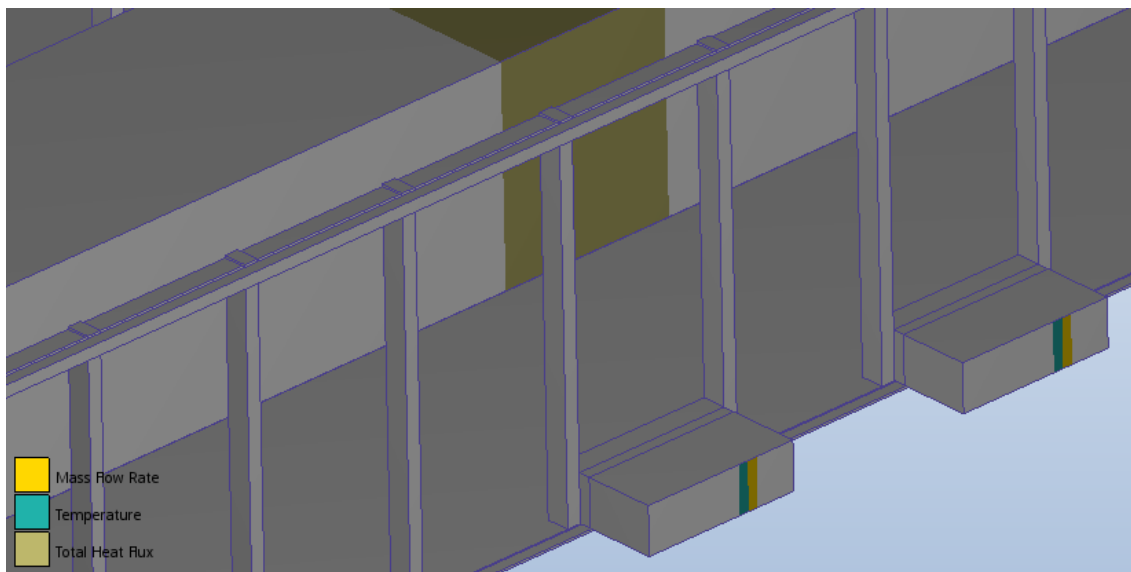


Kuva 17. Materiaalit valittuina Autodesk CFD 2017.

### 5.1.2 Reunaehdot

Reunaehdoilla määritellään simulaatiolle rajat ja fysiikka. Autodesk CFD 2017 voidaan valita pinnalle tai objektille haluttu ominaisuus, esimerkiksi massavirta tai kokonaislämpöteho. Kuvassa 18 on esitetty pintoihin kohdistuva fysiikka. Tuloilmakanavassa on vakio massavirta ja lämpötila, jotka syötetään sisälle simulaatioon. Kuvassa näkyy kartonkikoneen toinen kylki ja yläosa, joissa on energian kokonaisluovutusteho (Total Heat Flux).

Simulaatiossa tuloilmat ovat sisäänpäin virtauksia ja poistoilma-, prosessi- ja vuotoilmakanavat ovat ulospäin virtauksia. Molemmille on määrätty ja laskettu massavirta, jolloin kokonaistase ilmamäärien osalta on tasapainossa. Kartonkikoneen luovuttama energia on ilmoitettu kokonaistehona, joka luovutetaan lämpöenergiana tilaan.



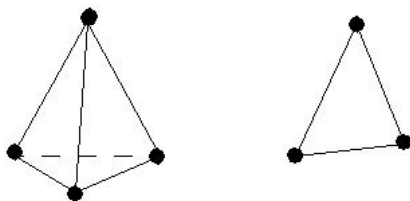
Kuva 18. Reunaehdot valittuina Autodesk CFD 2017.

### 5.1.3 Sisäiset reunaehdot

Sisäisillä reunaehdoilla voidaan asettaa simulaation alkutilanteeseen tiettyjä arvoja, kuten pinnalle lämpötila. Nämä ovat käytännöllisiä varsinkin aikariippuvaisissa simulaatioissa, mutta toimivat myös tasapainotilanteissa. Näissä simulaatioissa niitä ei käytetty.

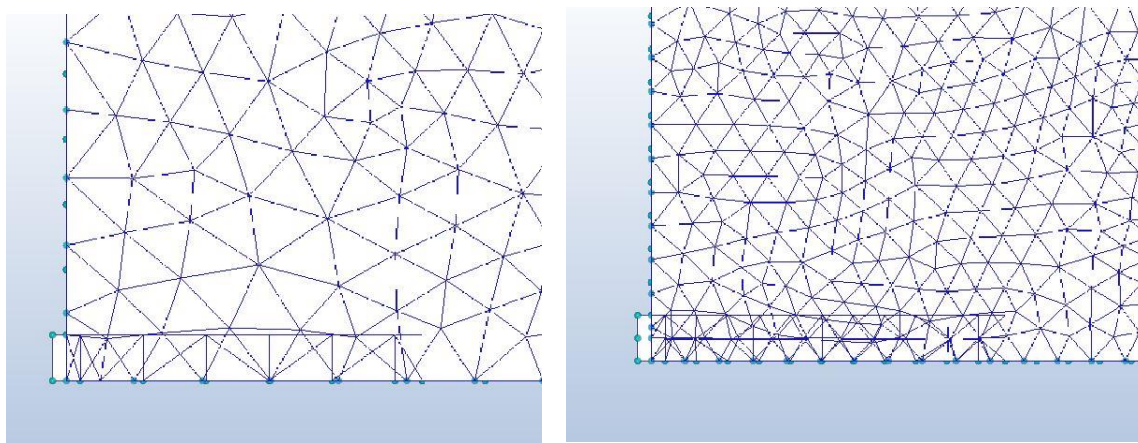
### 5.1.4 Laskentahila

Ennen kuin simulaatio voidaan suorittaa, geometriasta muodostetaan laskentaverkko tai -hila. Autodesk CFD 2017 -ohjelmassa geometriasta tehdään elementtejä (elements), joiden kulmissa ovat yhtymäkohdat (nodet eli laskentapisteet). Laskenta tapahtuu näissä pisteissä. Kuvassa 19 on esitelty 3D-simulaatioissa yleisemmin käytetyt tetraedrit ja 2D-elementeissä käytetyt kolmiot. [8.]



Kuva 19. Elementit ja laskentapisteen [8].

Autodesk CFD 2017 -ohjelmassa on automaattinen laskentahilan muodostus. Se muodostaa hila automaattisesti. Perusasetuksilla voidaan suorittaa karkeita simulaatioita, mutta tarkempiin simulointeihin hilaa pitää tihentää. Tihentäminen tapahtuu helpoiten koko laskenta-alueelle, jolloin automaattisen muodostuksen tekemät tihennykset säilyvät. Kuvassa 20 on automaattisilla asetuksilla tehty laskentahila ja hila noin kaksi kertaa tiheämmällä verkolla. Ohjelmassa on kuvien perusteella käytössä tilavuuden mukaan sopeutuva verkon rakennus. [8.]



Kuva 20. Vasemmalla automaattisilla asetuksilla tehty laskentahila ja oikealla noin kaksi kertaa tiheämpi.

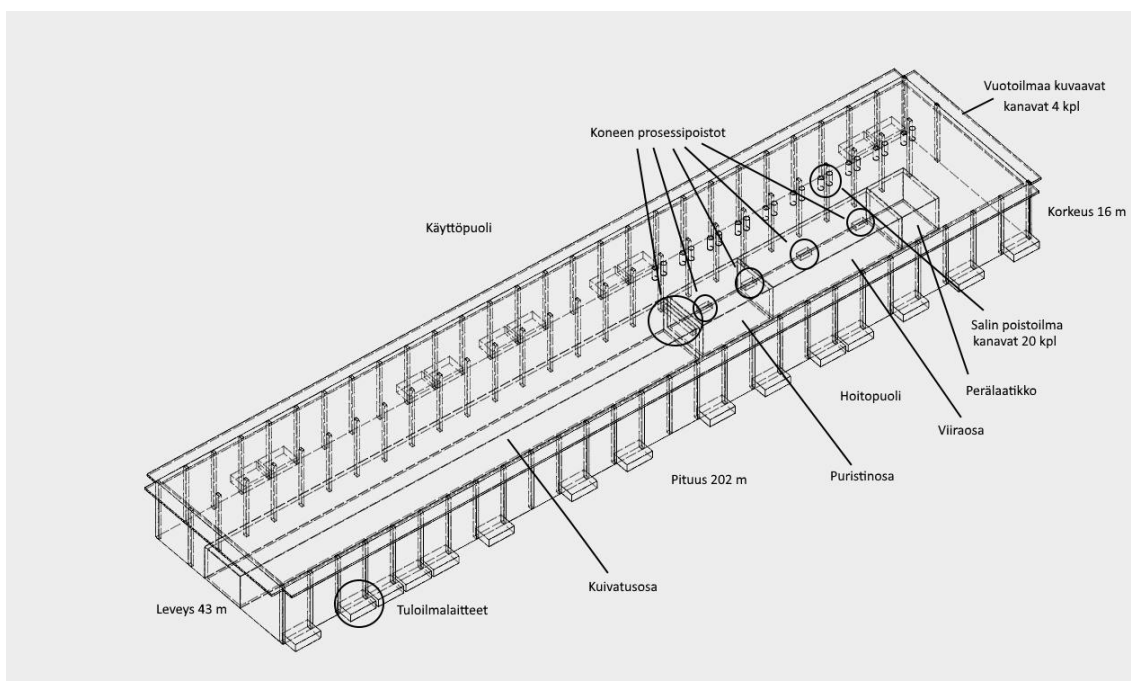
#### 5.1.5 Simulointi ja fysiikka

Ennen simulaation ajamista pitää päättää, millä fysiikalla laskentaa ruvetaan suorittamaan ja mitä halutaan laskea. Autodesk CFD 2017 voi säätää esimerkiksi advektio-mallia (kuvaa väliaineen siirtymistä), virtauksen turbulenttisuutta tai painovoimaa, jotka kaikki vaikuttavat oleellisesti simulointien onnistumiseen.

### 5.2 Geometrinen malli

Simuloinnit aloitettiin tekemällä geometrinen malli pohjakuvien perusteella. Ensimmäinen malli pyrittiin tekemään mahdollisimman tarkasti oikean suunnitelman mukaan, ja sitä tarkennettiin käytännössä koko työn ajan. Kuvassa 21 on esitelty geometrinen malli paperikonesalin märästä päästä ja kuivatusosasta, jonka mitat ja

keskellä oleva kone käytännössä pysyvät samana, ainoastaan tuloilma- ja poistoilmaelimiä muokattiin. Tuloilmaelimet ovat vastakkaisilla seinillä ja poistoilmaelimet katossa. Kuvassa 21 nähdään salin hoitopuoli (eli jossa oleillaan, ja jossa on valvomot) ja käyttöpuoli (eli jossa sijaitsee koneen käytöt). Oikeasti kartonkikonesali jatkuu kuvassa alaviistoon vasemmalle, mutta näihin simulointeihin otettiin huomioon pelkästään salin märkääpää. Keskellä oleva kartonkikone on huomattavan yksinkertaistettu. Oikealla on perälaatikko, viiraosa, puristinosa ja vasemmalla oleva on katettu huuva. Prosessipoistot päätettiin tehdä kartonkikoneen käyttöpuolelle.



Kuva 21. Kuva geometriasta.

## 6 Ensimmäiset simuloinnit

### 6.1 Simulointien aloittaminen

Ensimmäiset simuloinnit päätettiin tehdä kahtena "Testisarjana", joiden ideana oli saada toimiva simulointimalli ja myös tuloksia aikaiseksi. Kun toimiva malli oli olemassa, tehtiin lopulliset simulaatiot.

Liitteessä 1 on esitetty kartonkikonesalista esitelty kokonaistase, josta on laskettu poistojen suhteellinen osuus kokonaispoistosta. Näin tuleviin simulointeihin saatiin laskettua ilmamäärät. Taseessa näkyy myös huuuvan imemä ilmamäärä salista, joka arvioitiin yhteensä noin 10 %. Lisäksi liitteessä 1 on esitetty lämpö- ja kosteuskuormien arviot.

Liitteeseen 1 on kerätty tietoa fysiikasta ja laskentahilanmuodostuksesta ja lisäksi siitä, mitä asetuksia simuloinneissa on päällä. Automaattisiin asetuksiin tutustuttiin perustasolla.

## 6.2 Testisarja 1

Testisarja 1 ideana oli testata, kuinka laskenta toimii ja miten raskasta se on. Simuloinneissa käytettiin taseesta saatuja arvoja, jotka suhteutettiin viira-, puristin- ja kuivatusosan ilmapvirtamääriin. Liitteessä 2 on esitetty laskelmissa käytetyt ilmamäärät ja lämpökuormat. Näin voitiin testata, miten tuloilman määrä vaikuttaa nopeuteen ja lämpötiloihin. Kosteutta ei vielä tässä vaiheessa yritetty simuloida. Tässä vaiheessa ilmamääriin ja kuormiin ei kiinnitetty niin paljon huomiota, tärkeintä oli saada perustason simulointi läpi ja tutkia simulointeihin liittyviä ongelmia.

Ensimmäinen vakavampi virhe joka tuli, oli divergent-virhe. Virhe johtuu iteroinnissa tapahtuvassa poikkeavuudessa, eli kun normaalisti pyritään tarkentamaan tulosta ja pyrkimään tasapainotilanteeseen, joku arvo (esim. lämpötila) lähtee laskennassa vastakkaiseen suuntaan. Autodeskin verkkosivujen ongelmanratkaisuja selailemalla huomattiin, että virhe voidaan korjata tihentämällä laskentahilaa, korjaamalla geometriaa tai muilla vaihtoehtoisilla tavoilla. [8.]

## 6.3 Testisarja 1:n tuloksia, analyysseja ja korjaavia toimenpiteitä

Liitteessä 2 on kuvattu simuloinnista saatavia graafisia tuloksia. Alkupään simuloinneissa keskityttiin oleskeluvyöhykkeelle, eli 1,8 metrin korkeuteen lattiatasosta.

Liitteessä 2 (a) olevasta testin 1.13 nopeuskuvasta nähdään, ettei yksi tuloilmaelin ja prosessipoistot ole mukana laskennassa. Liitteessä 2 (c) testissä 1.14 on uusi

ilmanliike kuva vektorisuureilla tilanteessa, jossa tuloilma- ja prosessipoistot ovat korjatut. Liitteessä 3 (4,5) ovat lämpötila- ja nopeuskuvat tihennetyllä laskentaverkolla, ja korjatuilla kanavilla.

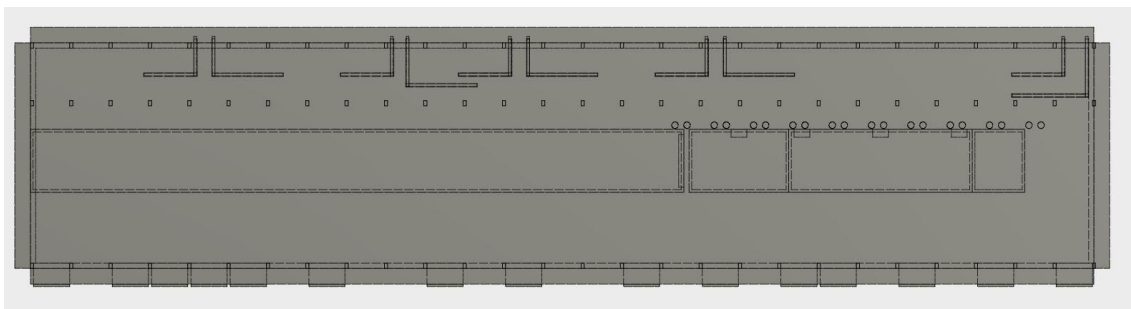
Ensimmäisten lämpökuorma-simulaatioiden perusteella ei voida vielä tehdä mitään kovin päteviä johtopäätöksiä. Käyttöpuolella olevat kovemmat lämpötilat korjaantuvat, koska myös sinne tuodaan tuloilmaa.

#### 6.4 Testisarja 2

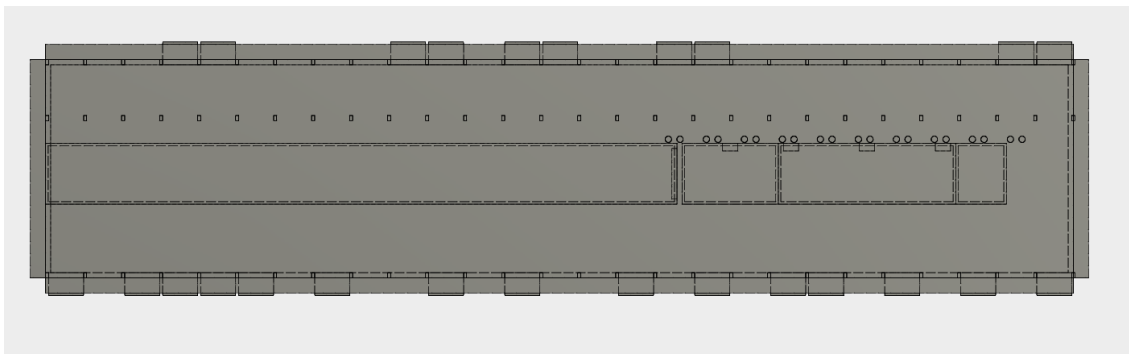
Ensimmäisiä simulointeja jatkettiin, ja ideana oli tarkentaa edelleen lämpökuormalaskentaa. Pohjakuvien perusteella salin muotoa tarkastettiin, ja geometriaan lisättiin tuloilmakanavia hoitopuolelle.

Käyttöpuolelle lisättiin tuloilmakanavat, ja päätettiin käyttää samanlaisia kanavia kuin hoitopuolella. Kanavina testattiin myös 500 mm reikäputkikanavia, mutta ne aiheuttivat liikaa turbulenssia käyttöpuolelle. Kuvassa 22 on esitelty kartonkikonesalin geometria ylhäältä päin kuvattuna reikäputkikanavilla ja kuvassa 23 geometria seinäkanavilla.

Näihin testeihin haluttiin mukaan kolmensuuruista tuloilmamäärää: 10 m<sup>3</sup>/s käyttöpuolelle, hoitopuolelle 14 m<sup>3</sup>/s ja 20 m<sup>3</sup>/s.



Kuva 22. Geometria käyttöpuolen reikäputkikanavilla (käyttöpuoli kuvassa ylhäällä).



Kuva 23. Geometria käyttöpuolen seinäkanavilla (käyttöpuoli kuvassa ylhäällä).

Geometriaan lisättiin ”kanava” rakennuksen katon ja seinän kulmaan, joka kuvaa vuotoilmaa ulos laskenta-alueesta. Tyhjiöpumppuja ei oteta laskennassa huomioon, koska niille on mitoitettu oma tulo- ja poistoilmamäärä.

Liitteessä 3 on esitetty simuloinnin valmistelevia suunnitteluarvoja, kun simuloinnissa oli mukana lämpökuorma ja tuloilmakanavat olivat molemmilla puolilla seinäkanavia (Testi 2.26). Koska jokaisessa testisimulaatiossa oli hieman toisistaan poikkeavia reunaehtoja, ei ollut järkevää kerätä niitä kaikkia liitteisiin.

## 6.5 Testisarja 2:n tuloksia, analyysieja ja korjaavia toimenpiteitä

Ensimmäisissä testisarjan 2 simulaatioissa testattiin pelkästään ilmanliikettä, eli simulaatioihin ei otettu mukaan lämpö- tai kosteuskuormia. Tällä tavoin voitiin varmistua, että ilman liike salissa on oikean suuntainen ja suuruinen.

Liitteessä 3 (a-b) on kuvattu ilman nopeutta simulaatiossa (Testi 2.12), jossa käyttöpuolen kanavina on reikäputkikanavat. Käyttöpuolen kanavista ei tule vielä ilmaa, pelkästään hoitopuoli ja vuotoilma toimivat. Kuvista huomataan, että hoitopuolen tuloilmakanavat toimivat yhtä lukuun ottamatta (ylhäältä katsottuna oikeanpuoleinen). Myös katon rajasta otetussa leikkauskuvasta huomataan, että ilman liike salin oikealla puolella on kovempi kuin vasemmalla. Virheet korjattiin geometriaa päivittämällä, eli käytännössä toimimaton kanava tehtiin uudelleen. Myös laskentahilaa tarkennettiin. Kyseisessä simulaatiossa on yhteensä reilut 2,8 miljoonaa elementtiä ja iterointeja on suoritettu 400.



Liitteessä 3 (c-g) on kuvattu simulaation "Testi 2.12" ilman nopeudet korjatulla geometrialla ja tihennetyllä laskentahilalla (Testi 2.17). Simulaation laskentaverkossa on melkein 4 miljoonaa elementtiä ja iterointeja on suoritettu 622. Aikaa kyseisen simulaation tekemiseen menee normaalilla työkoneella (Lenovo Thinkstation, Intel i7-3770, 8 ydintä, 16 Gb keskusmuistia, Nvidia Quadron K2000 -näytönohjain, normaali SATA-levy) 22 451 s (eli reilut 6 tuntia).

Kuvista nähdään, että oleskeluvyöhykkeellä (1,8 metrissä) käyttöpuolen ilman nopeudet kasvavat reilusti johtuen kanavien suuremmasta tuloilmanopeudesta. Vaakaleikkauskuvasta nähdään, että käyttöpuolen tuloilmakanavat toimivat odotetulla tavalla. Myös hoitopuolella tuloilman nopeudet kasvavat verrattuna aikaisempiin. Se johtuu todennäköisesti kovasta turbulenssista käyttöpuolella, mikä aiheuttaa laskentaan ongelmia, ja sekoittaa myös hoitopuolen ilmanvirtausta. Tämä taas saattaa johtua Autodesk CFD 2017 -ohjelman automaattisesta asetuksesta, jossa ohjelma ajaa ensin 50 iterointia ja päättää sen perusteella, miten jatkaa laskentaa. Asetuksen saa tarvittaessa pois päältä. Simulaatiota voisi myös yrittää korjata esimerkiksi muuttamalla advektio-järjestelmää tai turbulenssimallia, mutta koska simulaatiota päätettiin jatkaa seinäkanavilla, ei tähän toistaiseksi käytetty aikaa.

Ilman liike katonrajassa oleviin vuotoilma "kanaviin" vaikuttaa kovemmalta kuin pitäisi. Taseen perusteella ilmaa pitäisi virrata enemmän poistoilmakanaviin kuin vuotoilmakanaviin, mikä viittaisi siihen, että ilman liike ei toimi vielä halutulla tavalla.

## 6.6 Testisarja 2:n lämpökuormasimulaatiot, tulokset ja analysointi

Ilmanliikesimulaatioiden perusteella tehtiin korjaavia toimenpiteitä, ja päädyttiin simulaatioon "Testi 2.26", jonka reunaehdot on kuvattu liitteessä 3 ja tuloksia kuvattu liitteen 3 kuvissa (h-s). Simulaatiossa on noin 4,3 miljoonaa elementtiä ja aikaa simuloinnin tekemiseen meni 18 939 s (eli n. 5,5 h).

Simulaation valmistuttua ensimmäisenä tutkittiin poistoilman lämpötilaa, jonka arvot olivat noin 35 °C heti kanavan alussa. Kokemusperäisen tiedon perusteella poistoilman lämpötilat ovat yleensä hieman korkeammat, mutta riippuvat paljon salissa olevista kuormista. Ilman liike salin katonrajassa on oikean suuntainen, ja virtaa enemmän kohti

poistoilmalaitteita kuin vuotoilmakanavia. Myös prosessipoistot toimivat halutulla tavalla.

"Testin 2.26" jälkeen simulaatio jaettiin Autodeskin CFD-suunnittelijan kanssa, joka tarkasti simulaation ja antoi vinkkejä, miten sitä voisi vielä parannella. Tärkein yksittäinen ohje oli muuttaa advektiojärjestelmä 1:stä ("Monotone streamline upwind") numero 5:een ("Modified Petrov-Galerkin"). Vinkkejä testattiin lopullisissa simulaatioissa.

## 7 Lopulliset simuloinnit

Koska näihin simulointeihin käytettävissä olevassa koneessa keskusmuistin määrä oli 16 gigatavua, suositusten mukaan Autodesk CFD 2017 -ohjelmalla voisi tehdä 8 miljoonan laskentahilan verkon (1 miljoonaa / 2 gigatavua) [8].

Kaavasta 3 saadaan minimilaskentahilojen määrä tämänkokoiselle tilalle:

$$V = 44,4 * 10^3 * (202 * 40 * 16)^{0,38} = 3,89 * 10^6$$

Lopullisiin simulointeihin tehtiin vaihtelevasti laskentahilat, mutta pyrittiin tekemään niistä kuitenkin tarpeeksi tiheitä. Autodesk CFD 2017 -ohjelman automaattisiin laskentahilan muodostamisen asetuksiin ei puututtu, vaikka todennäköisesti niitäkin optimoimalla olisi tuloksia saanut tarkennettua.

Kaikkiin simulointeihin muutettiin advektiojärjestelmä numero 1:stä numero 5:een, mutta muuten simulaatiot on suoritettu kuten liitteessä 1 on määritelty.

### 7.1 Lämpökuormasimulointi

Laskentahilaa tarkennettiin hieman, siinä on noin 5,6 miljoonaa elementtiä, joissa on noin 12,4 miljoonaa laskentapistettä. Laskennassa käytettiin samoja reunaehtoja kuin aikeisemmissa simuloinneissa. Reunaehdot on esitelty liitteessä 3 ja tuloksia on kuvattu liitteessä 4 (a-q). Iterointeja suoritettiin siihen asti, kunnes CFD-ohjelmisto päätti laskennan tasaantuessa lopettaa sen. Iterointeja tehtiin 386, ja iterointi suorat on

kuvattu liitteessä 4 (q). Näillä arvoilla simuloinnin suorittamiseen meni aikaa noin 9 tuntia.

Advektiojärjestelmän muuttaminen numero 1:stä numero 5:een näyttäisi muuttavan virtauskenttää varsinkin käytävien keskellä ja ilmatilavuudessa. Tämä vaikuttaa myös alentavasti lämpötiloihin kaukana seinistä, joka huomataan vertailemalla kahden simuloinnin [(liite 3 (l) ja liite 4 (f))] kuvia lämpötilasta kahdeksassa metrissä. Lisäksi vallitseva staattinen paine näyttäisi olevan salin alaosassa korkeampi.

Käyttöpuolen ilman lämpötila nousee korkeammaksi ja nopeudet ovat pienemmät kuin hoitopuolella johtuen pienemmästä tuloilmamäärästä. Koska käyttöpuolelle kartonkikoneen käydessä on harvemmin asiaa, on hoitopuolen lämpötila tärkeämpää pitää alempana oleskeluviihtyvyyden takia. Simulaation perusteella hoitopuolen lämpötila ei kohoa yli 33 °C:n [liite 4 (e)].

Lämpökuormasimulaation perusteella 10 m<sup>3</sup>/s ei riitä tuloilman määräksi, koska ilma hidastuu liikaa ennen kuin se osuu kartonkikoneeseen. Näin ollen lämpökuorman aiheuttama lämpösäteily pääsee vaikuttamaan suoraan tuloilmakoneiden välisiin pintoihin, kuten liitteen 4 (e) kuvasta huomataan.

Käyttöpuolella sijaitsee muitakin kuumia lähteitä kuin pelkästään kartonkikoneesta aiheutuva kuorma. Niille voidaan tuoda tuloilma suoraan kanavalla tai sijoittaa ne niin, että seinän tuloilmalaitteet viilentävät niitä. Tässä simulaatiossa niitä ei otettu huomioon. Simulaatioiden perusteella käyttöpuolen tuloilma ei nouse yli 40 °C:n käytetyillä tuloilmamäärillä, mutta tulos voi muuttua huomattavasti reunaehtojen tarkentuessa.

Tuloilman nopeus sen osuessa kartonkikoneeseen näyttäisi pysyvän alle 0,7 m/s koneilla, joiden tuloilmamäärä on 14 m<sup>3</sup>/s. Suuremmalla ilmamäärällä 20 m<sup>3</sup>/s tuloilman nopeus nousee lähelle arvoa 1 m/s. Tuloilman liike hidastuu ennen kuin se osuu kartonkikoneeseen, mikä johtuu lämpökuorman aiheuttamasta pluumista. Kahdeksassa metrissä ilma kohoo kohti kattoa nopeammin kartonkikoneen sivuja pitkin kuin keskellä käytävää.

Tuloilman nopeuden tulisi olla tarpeeksi alhainen, kun se osuu kartonkikoneeseen. Normaalisti huuvin sivut ovat ajon aikana suljettuina, mutta esimerkiksi ratakatkon

sattuessa sivut nousevat ylös. Mikäli nopeus on liian suuri, saattaa raina ruveta ”lepattamaan”, mikä vaikeuttaa koneen käynnistämistä.

Lämpötila katonrajassa näyttäisi pysyvän näiden simulaatioiden perusteella suurimmaksi osaksi alle 37 °C:n, kuten liitteestä 4 (h) huomataan. Kuumin kohta katonrajassa on suoraan tuloilmojen alla ja kartonkikoneen päällä. Tämä johtuu siitä, että koneesta kohoava lämpökuorma menee suoraan poistoilma-aukkoihin, eikä syrjäyttävä ilmanvaihto toteudu.

## 7.2 Tuloilman lämpötila 20 °C

Yhtenä simulointina haluttiin testata, miten tuloilman lämpötilan alentaminen vaikuttaa tuloksiin ja salissa vallitseviin olosuhteisiin. Reunaehdoja ei muutettu muuta tuloilman lämpötilan osalta, muut reunaehdot on esitelty liitteessä 3. Liitteessä 5 (a-q) on esitelty tuloksia. Laskentaverkko oli yhtä tiheä kuin lämpökuormasimulaatiossa ja laskenta-aika yhtä pitkä. Iterointeja suoritettiin 378, ja iterointisuorat on kuvattu liitteessä 5 (q)

Lämpötilat salissa ovat noin kahdeksan astetta alhaisempia kuin lämpökuormasimulaatiossa. Samoin poistoilman lämpötilat ovat suunnilleen saman verran alempana kuin tuloilman lämpötilaero. Nopeuskuvista nähdään, ettei virtauskenttä muutu, vaikka lämpötilaa lasketaan. Käytännössä simulointi on siis samanlainen kuin lämpökuormasimulointi, erona ovat vain alhaisemmat lämpötilat.

Ainut johtopäätös näin tehdyllä simulaatiolla ja annetuilla reunaehdoilla on, että salin ilman lämpötilan muutos on suoraan suhteessa tuloilman lämpötilaan.

## 7.3 Tuloilmalaitteiston muutokset

Työssä haluttiin myös tutkia miten tuloilmalaitteiden sijoittelu vaikuttaa salin lämpötiloihin. Lisäksi tähän simulaatioon poistettiin yksi 14 m<sup>3</sup>/s tuloilmalaitte hoitopuolelta. Uudelleen lasketut reunaehdot on esitelty liitteessä 6 ja liitteessä 6 (a-q) on esitelty tuloksia. Tähän simulaatioon tehtiin myös aikaisempia huomattavasti tiheämpi laskentaverkko. Laskentaverkko käsitti noin 20,5 miljoonaa elementtiä ja noin 46 miljoonaa laskentapistettä, eli reilusti yli Autodeskin suositusten. Iterointeja

suoritettiin 373, ja laskenta-aika oli lähes 67 tuntia. Simulaatio tehtiin myös laskentaverkolla, jossa oli noin 5,5 miljoonaa elementtiä ja noin 12,5 miljoonaa laskentapistettä. Näin varmistettiin, että laskentaverkon tihentäminen ei aiheuta ongelmia laskentaan, vaan tulokset ovat samansuuntaisia molemmilla simuloinneilla.

Tiheämpi laskentaverkko näyttää enemmän ilmavirroista ja turbulenssista johtuvia pyörteitä, jotka voidaan nähdä nopeuskuvista liitteestä 6 (a-c). Jos verkkoa vielä tihennettäisiin, voitaisiin periaatteessa saada näkyviin turbulentin aiheuttamia mikropyörteitä. Näin ison tilan LES-simulointi vaatisi lähes 400 miljoonan laskentahilan, joten käytännössä se ei normaalilla tietokoneella onnistu.

Katonrajassa oleva lämpötila on korkeampi kuin aikaisemmissa simulaatioissa, kuten kuvista liitteessä 6 (g-i) ja poistoilman lämpötiloista liitteessä 6 (k) nähdään. Vaikka tässä simulaatiossa on yksi tuloilmalaite vähemmän, se ei yksinään selitä korkeampaa lämpötilaa. Todennäköisesti se johtuu tiheämmästä laskentaverkosta, jolloin kartonkikoneen aiheuttama konvektio ja seinien aiheuttama säteily näkyvät eri tavalla simulaatiossa.

Vaikka tuloilmalaitteita sijoitettiin tasaisemmin käyttöpuolelle, ei ilmamäärä  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  riitä pitämään lämpötilaa alhaisempana niiden välissä. Vaikka tällä saavutetaan etuna pienempi tuloilmanopeus, kun se osuu kartonkikoneeseen, kovempi lämpötila on suurempi haitta. Tuloilman määrää voisi optimoida ja etsiä alhaisin arvo, jolla lämpötila pysyy hallinnassa paremmin, kun tuloilmakoneiden sijoitukset ovat tiedossa.

Hoitopuolella taas yhden tuloilmakoneen poistaminen ei haittaa. Tähän voi vaikuttaa poistetun koneen vasemmalla puolella oleva tuloilmamäärä  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Toisaalta jos vertaillaan käyttö- ja hoitopuolen 1,8 metrin lämpötilaa [liite 6 (d-e)], se nousee pylväsväleissä ensimmäiseksi mainitulla huomattavasti korkeammaksi kuin hoitopuolella. Siten  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  ei riitä viilentämään tarpeeksi koneesta aiheutuvaa lämpökuormaa, vaan tuloilman määrän pitää olla suurempi.

## 8 Yhteenveto

CFD-simulointi on kokemattomalle todella vaikea kokonaisuus. Työn edetessä tuli eteen monia kohtia, jotka olisivat voineet parantaneet simulaation tarkkuutta. Kaikki

mitä CFD-simulointiin määritellään vaikuttaa siihen miten hyvin todellisuutta kuvaavat simuloinnit ovat ja miten hyvin ne onnistuvat. Liitteeseen 7 on kerätty huomioita siitä, mitä tulevaisuudessa voisi tehdä ja miten näitä simulaatioita voisi muuttaa tai parantaa.

Tärkein yksittäinen tulos oli tuloilman nopeuden vaikutus lämpötilaan oleskeluvyöhykkeellä. Tuloilman nopeus 0,72 m/s (10 m<sup>3</sup>/s) ei näyttäisi riittävän lämpötilan pitämiseen tarpeeksi alhaisena. Nopeudella 1,45 m/s (20 m<sup>3</sup>/s) tuloilma taas osuu liian kovaa kartonkikoneen kylkeen. Nopeus 1,01 m/s (14 m<sup>3</sup>/s) näyttäisi olevan näistä kolmesta paras vaihtoehto. Tähänkin vaikuttaa paljon se, miten tuloilmalaitteet on mallinnettu ja miten ne on suunnattu, joten niiden optimoinnilla voitaisiin saavuttaa säästöjä sekä laitehankinnoissa että puhallintehoissa. Ohjelmalla ei saatu vielä tarkasteltua, miten tuloilman vähentäminen asteittain vaikuttaisi olosuhteisiin.

Työssä oli tarkoituksena ottaa myös ilmassa oleva kosteus ja kartonkikoneen aiheuttama kosteuskuorma mukaan simulointeihin, mutta valitettavasti aika ei riittänyt simulointien tekemiseen. Autodesk CFD 2017 -ohjelma ei tue haihtumista, joten suoraan koneesta aiheutuvaa kosteuskuormaa ei saada simuloitua [8].

Yhteensä tässä työssä käytettiin simulointien tekemiseen useita satoja tunteja, joista suurin osa oli koneen suorittamaa laskentaa. Laskentakapasiteetti oli työlle merkittävä pullonkaula. Simulointien valmistelu on suhteellisen helppoa, ja samoin geometrian muuttaminen. Tämä mahdollistaisi erilaisten skenaarioiden testaamisen, joista tähän työhön suoritettiin vain muutama. Näistä perussimuloinneista pitäisi ruveta tekemään optimointeja esimerkiksi tuloilman suhteen.

Autodesk CFD 2017 -ohjelma on aloittelijalle helppo käyttää. Tilanteiden mallintaminen ei vaadi syvempää koulutusta, vaan erilaisten ohjeiden ja opasteiden avulla saa muodostettu toimivia simulaatioita. Automaattisilla asetuksilla saadaan jonkinlaisia tuloksia aikaiseksi, oikeastaan laskentaverkon tihentäminen on ainut, jonka joutuu käsin säätämään.

Tulosten oikeellisuutta ja kytköstä tosielämään on vaikeampi arvioida. CFD -simulointi vaatii pitkän kokemuksen, jotta mallista saadaan matemaattisesti toimiva ja jotta reunaehdot kuvaavat tosielämää. Työssä jouduttiin arvioimaan kriittisiä suureita, kuten lämpökuorman jakautuminen kartonkikoneesta. Sen vaikutus tuloksiin saattaa olla todella suuri.

Perustietämys virtaustekniikasta ja termodynamiikasta auttaa alkuun simulointien valmistelussa, mutta syvempi tietämys molemmista mahdollistaisi helpommin virheiden löytämisen ja laskennan optimoinnin. Mikäli reunaehtoihin joudutaan arvaamaan suureita, auttaa työelämässä saatu kokemus näiden määrittämiseen. Monimutkaisessa simulaatiossa on harvemmin saatavilla kaikki reunaehdot, vaan niitä joudutaan määrittämään esimerkiksi savukokeilla tai mittauksilla. Tulosten validointi auttaakin simulointien virheiden löytämisessä ja myös parantaa tulevaisuuden CFD-simulointeja.

CFD-simulointi on todella haastavaa, mutta sillä on suuret potentiaalit. Nykyiset ohjelmat ovat helppokäyttöisiä, ja normaalilla tehokkaalla PC:llä voidaan tehdä aikakeskiarvotettuja simulointeja isoistakin tiloista. Koska Autodesk CFD 2017 -ohjelma tekee paljon automaattisia asetuksia, pitäisi suunnittelijalla olla hyvä tietämys virtaussimulointien teoriasta.

## Lähteet

- 1 Knowpap. 2013. Paperitekniiikan ja automaation oppimisympäristö. AEL: 1997–2013.
- 2 Sandberg Esa. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut
- 3 Suihkonen Juhani. 2016. HVAC Desing Manager, Pöyry Finland Oy. Keskustelu 6.6.2016.
- 4 IDA Indoor Climate and Energy. 2016. Verkkodokumentti. EQUA Simulation AB. <http://www.equa.se/en/ida-ice>. Luettu 12.7.2016.
- 5 Autodesk help. 2016. Verkkodokumentti. Autodesk. <http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2017/ENU/?guid=GUID-79AA9A74-FCAC-42CE-B835-0BF3DEA36EFA>. Luettu 13.7.2016.
- 6 Goodfellow, Howard; Tähti, Esko. 2001. Industrial Ventilation Design Guidebook. California: Academic Press.
- 7 Nielsen, Peter V. 2007. Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design. Bryssel: Rehva
- 8 Autodesk CFD knowledge. 2016. Verkkodokumentti. Autodesk. [https://knowledge.autodesk.com/support/cfd]. Luettu 20.7.2016.



## Taselaskelma kartonkikonesalista ja asetukset Autodesk CFD 2017 -ohjelmalle

TASELASKELMASTA, KARTONKIKONEEN ILMAMÄÄRÄT					Määrä [kg/s]	Suhde	
POISTOT						kokonaispoistosta	
Viira- ja puristinosan poistot			Prosessi		133	0,108	
Kuivatusosan poistot, huuva			Prosessi		175	0,142	
5 % per pää otetaan salista eli					17,5	0,014	
Tyhjiöpuhaltimet			Prosessi		30	0,024	
Päällystyskoneen poisto			Prosessi		10	0,008	
Pulpperin poisto			Prosessi		34	0,028	
Märänpään poisto			Halli		480	0,390	
Liimapuristin alueen poisto			Halli		48	0,039	
Päällystyskone-alueen poisto			Halli		48	0,039	
Pituusleikkuri alueen poisto			Halli		96	0,078	
Pakkaamon poisto			Halli		96	0,078	
Vuotoilma			Halli		80	0,065	
Yhteensä					1230	1,000	
TULOILMA							
Tuloilma koneet			Halli		938		
Tuloilma koneet, pituusleikkuri			Halli		192		
Tuloilma, pakkaamo			Halli		100		
Yhteensä					1230		
LÄMPÖKUORMAT JA KOSTEUS, ARVIO					kW	kg/s [H2O]	
Viiraosan kuormat					1700	3,723	
Käyttötasolle		70			1190	2,606	
Kellariin		30			510	1,117	
Kuivatusosan kuormat					1500	1,08	
Käyttötasolle		70			1050	0,756	
Kellariin		30			450	0,324	
Pintaliimauskoneen kuormat					1200	0,5	
Jälkikuivatus ja kalanteri					1600	0,6	
Päällystys ja rullain					1900	1	
Pituusleikkuri					500	0,1	
Tyhjiöpumput					160 - 320		

**Autodesk CFD 2017:n fysiikka ja reunaehdot**

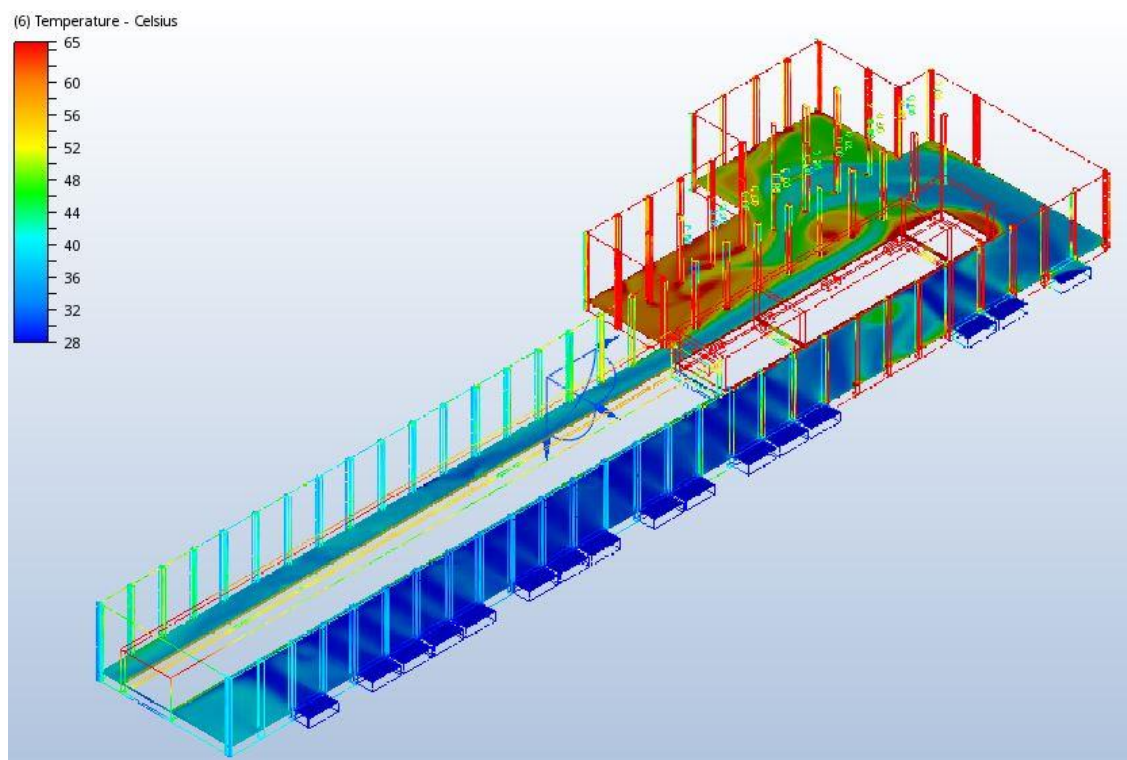
- Ilmatilavuus ja tuloilma ovat "Fixed, use scenario environment". Siten ilman ominaisuudet muuttuvat simuloinnin edetessä.
- Tulo- ja poistoilman tase laskettu, molemmille määrätty massavirta
- "Steady State" -laskenta, eli määrät, lämpötila ja lämpökuorma vakio. Laskenta päättyy tilassa vallitsevaan tasapainotilanteeseen
- Laskentahila muodostetaan automaattisesti. Koko laskentahilaa tihennetään suhteellisesti, eli automaattisen asetuksen muodostama hila pienenee kaikkialta.
- "Intelligent Solution Control" -asetus on päällä. Ohjelma laskee automaattisesti simulointeihin määriteltyjen arvojen perusteella "iterointiväliä".
- Lämmönsiirto, säteily ja painovoiman vaikutus (suunta 0,0,1) päällä.
- Turbulenssimallina k-ε
- Advektiojärjestelmä nro 1 (Monotone streamline upwind)

## Testisarja 1 simuloinnin reunaehdoista ja kuvia tuloksista

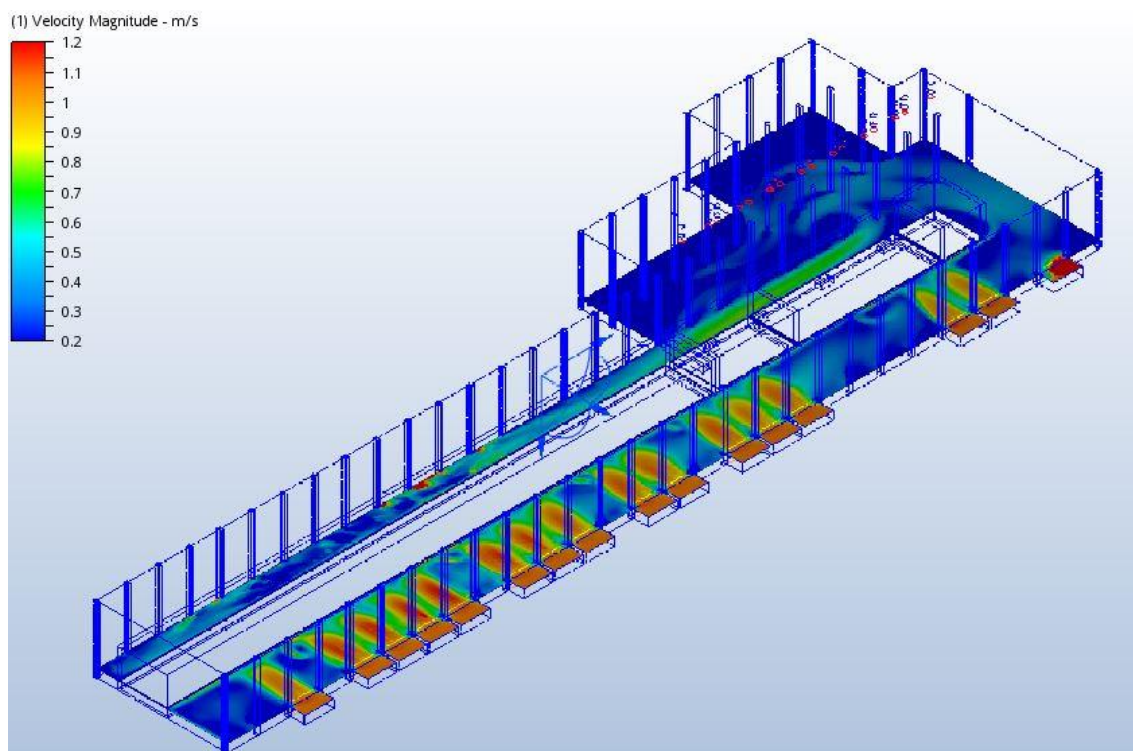
Taulukko kartonkikoneen ilmamääristä ja simuloinneissa käytetyistä reunaehdoista

<b>TULOT</b>						
Koska simulaatiossa ei oteta huomioon jälkikäsitteilyaluetta, tuloilman määrät on laskettu kokonaistaseesta						
Määräävä ilmamäärä tuloilmakoneista mässä päässä					kg/s	m3/s
Tuloilma					24	
Kellariin	30 %				7	
Käyttötasolle	70 %				<b>16,80</b>	
Tuloilmakoneita 16 kpl			yhteensä		268,80	224
Vuotoilmaa ei oteta ensimmäisessä huomioon						
Ensimmäisessä simulaatiossa tuloilma = poistoilma, karsitaan taulukon mukaiseksi						
Geometriassa tuloilmakanava on 6,9 * 2 m eli nopeus halliin						
					<b>1,0 m/s</b>	
<b>POISTOT</b>						
Poistoissa otetaan ensin prosessin vaatima ilmamäärä, loppu virtaa poistoilmakanavista						
					Määrä [kg/s]	suhde kokonaispoistosta
Viira- ja puristinosan poistot		Prosessi			27	0,100
	Poistoja simulaatiossa 4 kpl				<b>6,7</b>	
Kuivatusosan poistot, huuva		Prosessi			<b>8</b>	0,030
Märänpään poisto		Halli			234	0,870
					269	
Yhteensä					269	1,000
Poistoilmakanavia mässä päässä 16 kpl						
Yhden kanava poistoilmamäärä					<b>14,6</b>	

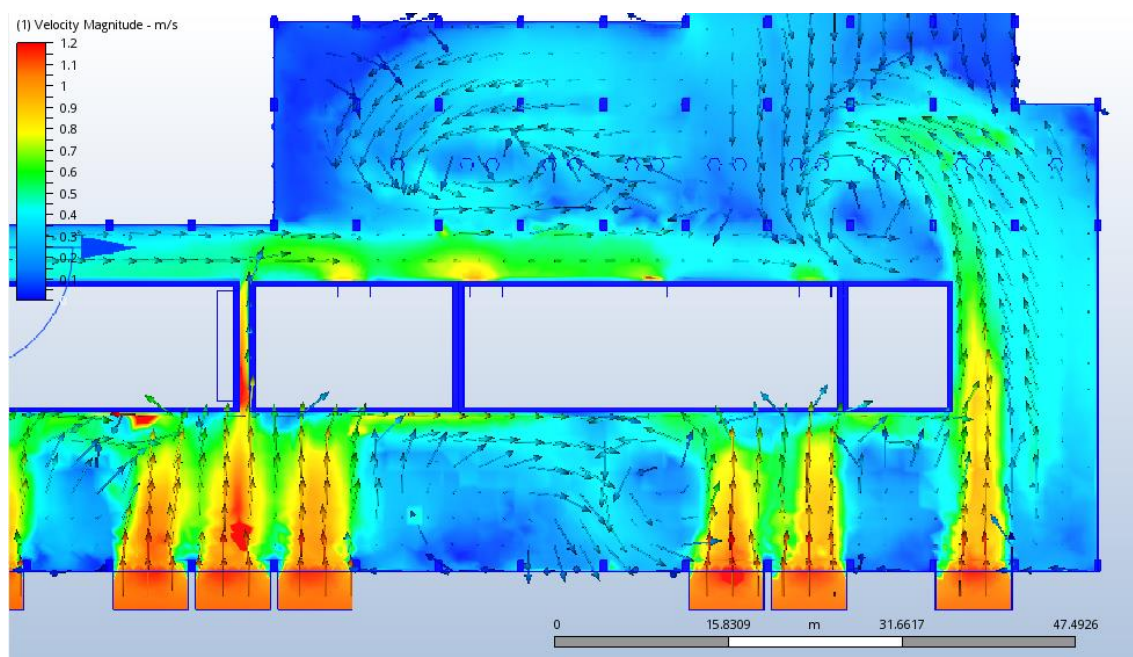
LÄMPÖKUORMAT, ARVIO					
Lämpökuormia vähennetään suhteessa käytettyyn ilmamäärään, jotta ilmamäärä riittää poistamaan kuormat					
					kW
Viiraosan kuormat					1700
	Käyttötasolle	70			1190
	Kellariin	30			510
Kuivatusosan kuormat					1500
	Käyttötasolle	70 ?			1050
	Kellariin	30 ?			450
Kuormat yhteensä, käyttötasolle					2240
Lämpökuormat jaetaan koneeseen suhteessa 70% päälle, 15 % molemmille sivuille					
		70	15		
	Viiraosa	700	150	kW	
	Kuivatusosa	618	132	kW	



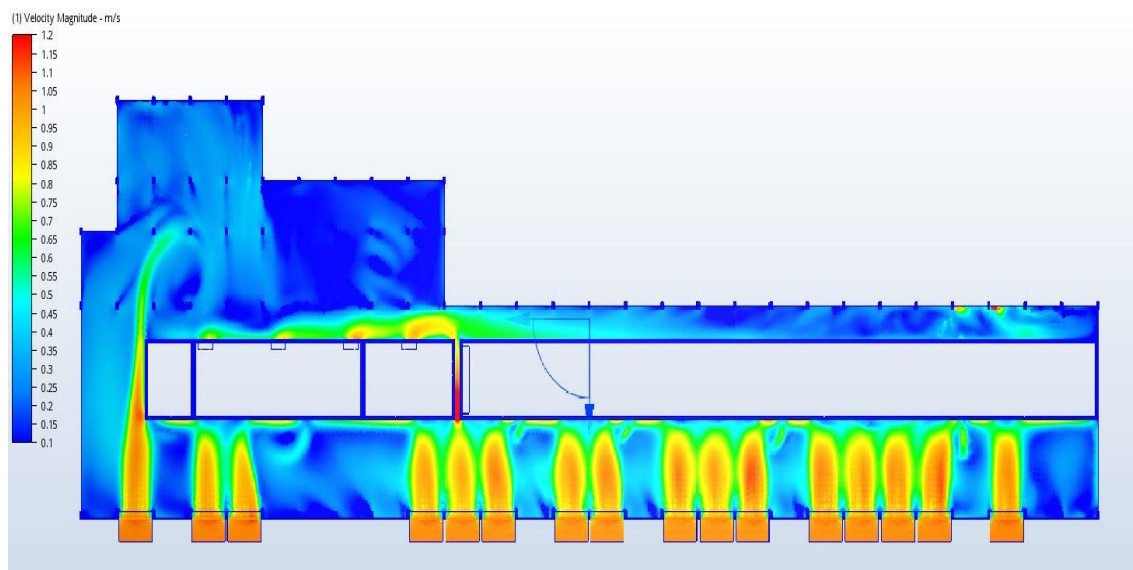
a) Testi 1.13. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 28–65 °C



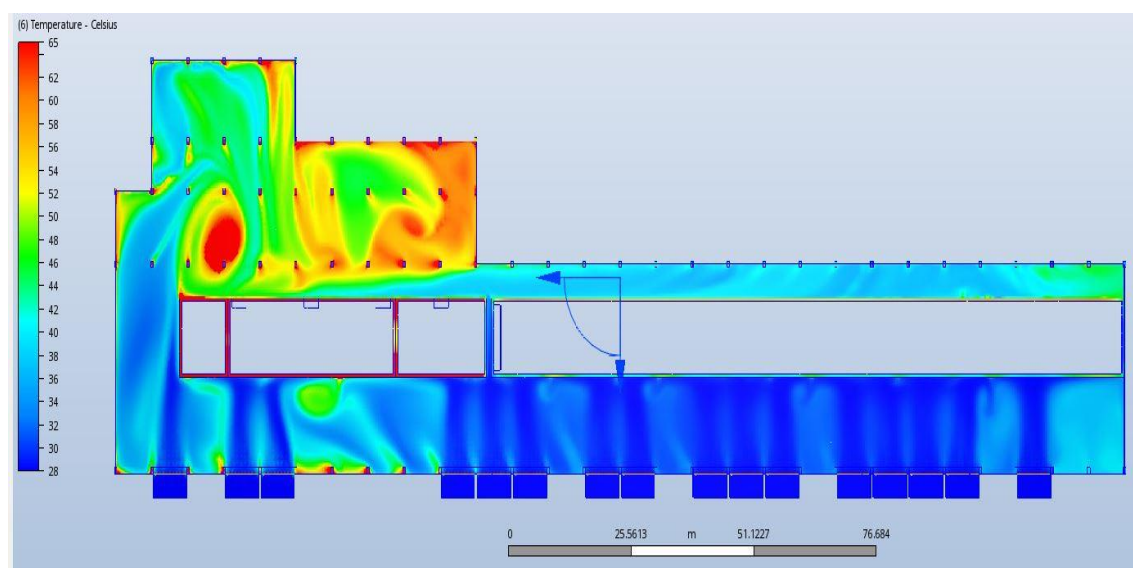
b) Testi 1.13. Nopeusjakauma 1,8 metrissä asteikolla 0,2–1,8 m/s



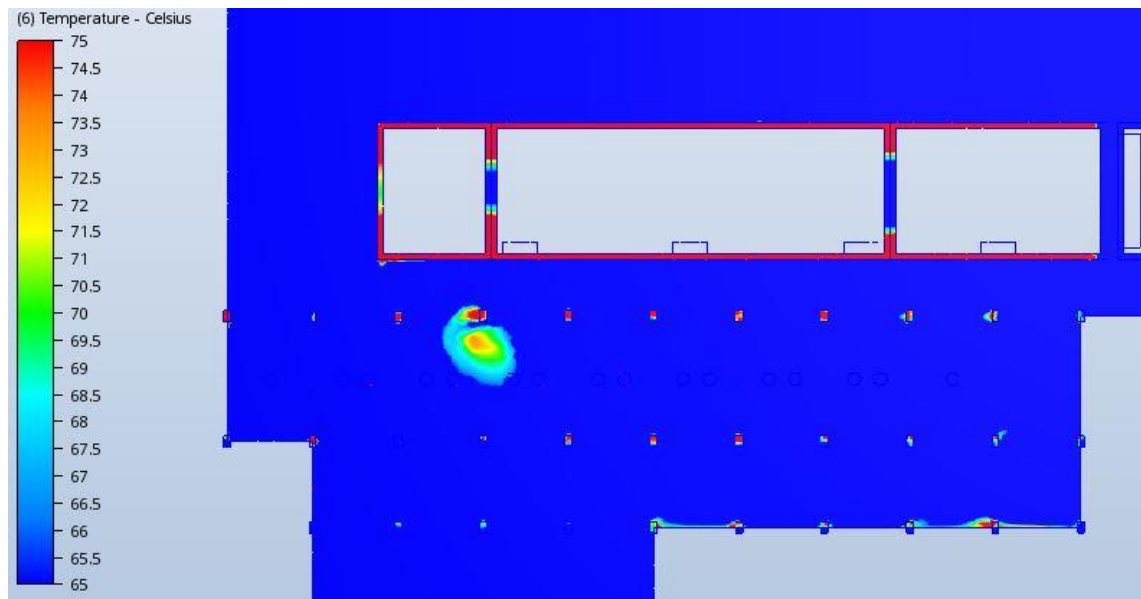
c) Testi 1.14. Ilmanliike 1,8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s.



d) Testi 1.18. Nopeusjakauma 1,8 metrissä asteikolla 0,1–1,2 m/s.



e) Testi 1.18 Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 28–65 °C



f) Testi 1.18. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 65–75 °C

## Simulointien reunaehdot ja kuvia ”Testi 2.26” -tuloksista

Taulukko simulaatioiden reunaehdoista

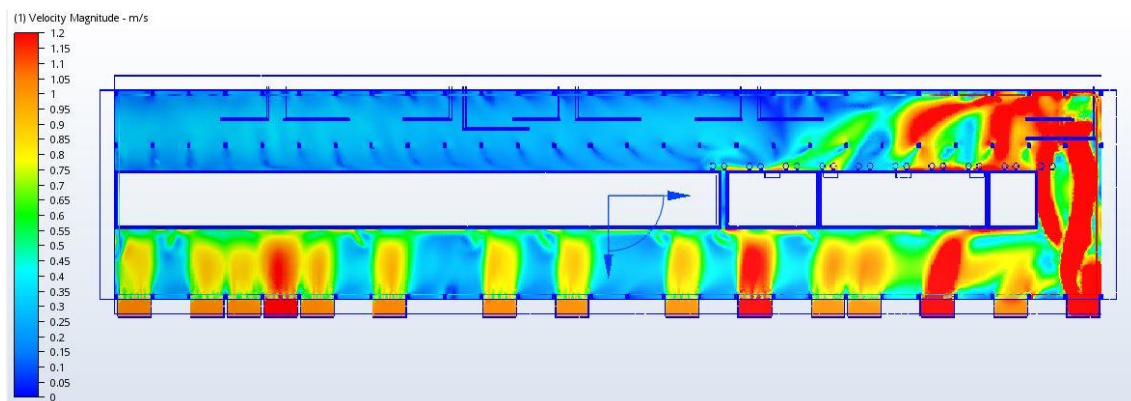
POISTOILMA				Määrä [kg/s]	Suhde kokonaispoistosta	Käytetään simulaatiossa (kg/s)
Viira- ja puristinosan poistot		Prosessi		38	0,100	
Poistoja simulaatiossa 4 kpl				9,6		9,6
Kuivatusosan poistot, huuva		Prosessi		11,5	0,030	11,5
						49,9
Märänpään poisto		Halli		309	0,805	
				359,4		
Vuotoilma				25,0	0,065	24,4
	4 lile sivulle			6,2		6,1
Yhteensä				384,4	1,000	
Poistoilmakanavia määrässä päässä	20 kpl					15,5
Yhden kanava poistoilmamäärä				15,5 kg/s		310
				384,4		384,3
<b>TULOILMA (KUIVAA ILMAA)</b>						
Tuloilmamäärä määrävä tekijä						
Tuloilman lämpötila	28 °C	Tiheys	1,172 kg/m3			
Kellaritilassa 40 m3/s tuloilmakoneita, 20 m3/s käyttötasolle						
<b>Hoitopuoli</b>						
Määrä, seinäkone	12 kpl					Käytetään
20 m3/s koneita, 70 % käyttötasolle						
1 kpl	14 m3/s	16,4 kg/s			16,4	
	168 m3/s	196,9 kg/s				196,8
Määrä, kellarikone	3 kpl	4-5, 9-10, 22-23	3, 6 ja 3-v			
20 m3/s käyttötasolle						
1kpl	20 m3/s	23,4 kg/s			23,5	
	60 m3/s	70,3 kg/s				70,5
<b>Käyttöpuoli</b>						
Määrä, LTO tason kone	5 kpl					
20 m3/s käyttötasolle	20 m3/s					
	100 m3/s	117,2 kg/s				
Seinäkanavia	10 kpl					
	10 m3/s	11,7 kg/s			11,7	117
YHTEENSÄ	328 m3/s	384,4 kg/s				384,3

Jatkuu

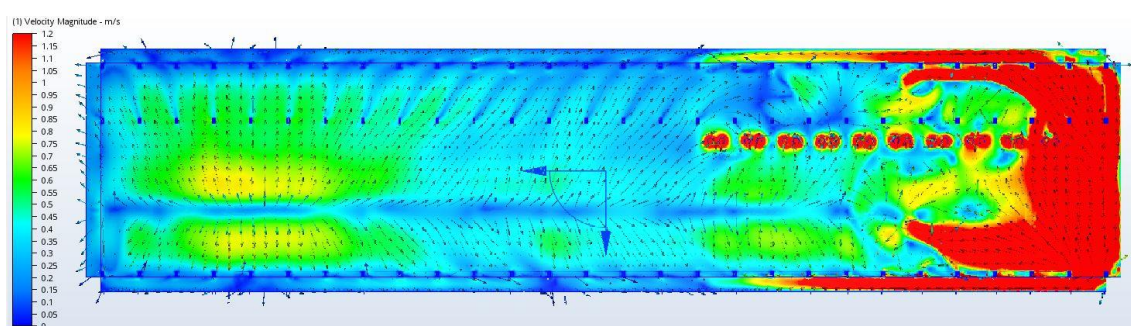


<b>Tuloilman nopeus</b>		
Leveys	6,9	m
Korkeus	2	m
Ala	13,8	m <sup>2</sup>
Ilmamäärä [m <sup>3</sup> /s]	Nopeus [m/s]	
10	0,72	
14	1,01	
20	1,45	

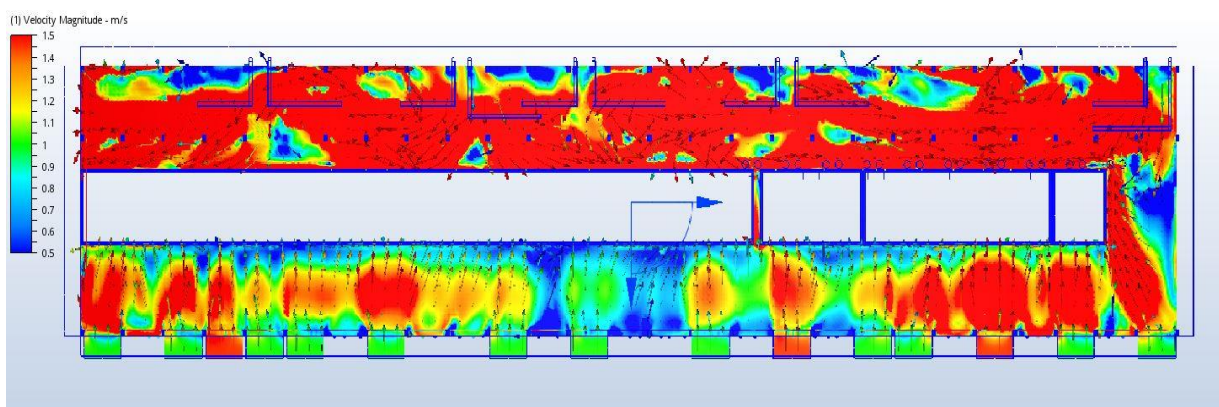
<b>LÄMPÖKUORMA</b>						
Otetaan koko lämpökuormasta 70 % käyttötasolle						kW
Viiraosan kuormat						1700
	Käyttötasolle		70			<b>1190</b>
	Kellariin		30			510
Kuivatusosan kuormat						1500
	Käyttötasolle		70			<b>1050</b>
	Kellariin		30			450
	Yhteensä					
	Käyttötasolle		70			<b>2240</b>
	Kellariin		30			960
Lämpökuormat jaetaan koneeseen suhteessa 70% päälle, 15 % molemmille sivuille						
				70	15 %	
	Viiraosa			833	179	kW
		geometria 3 osassa		278	60	
	Kuivatusosa			735	158	kW
						kW



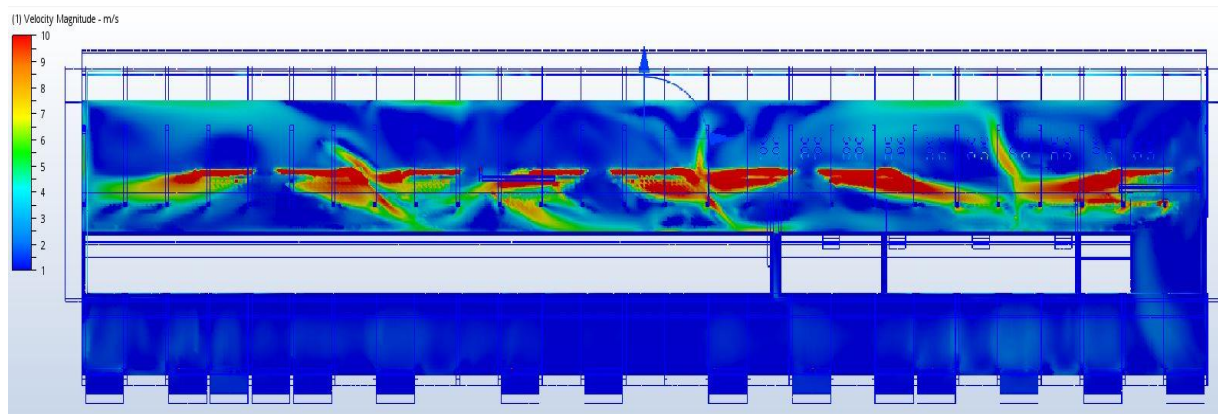
a) Testi 2.12. Ilman nopeus 1,8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s



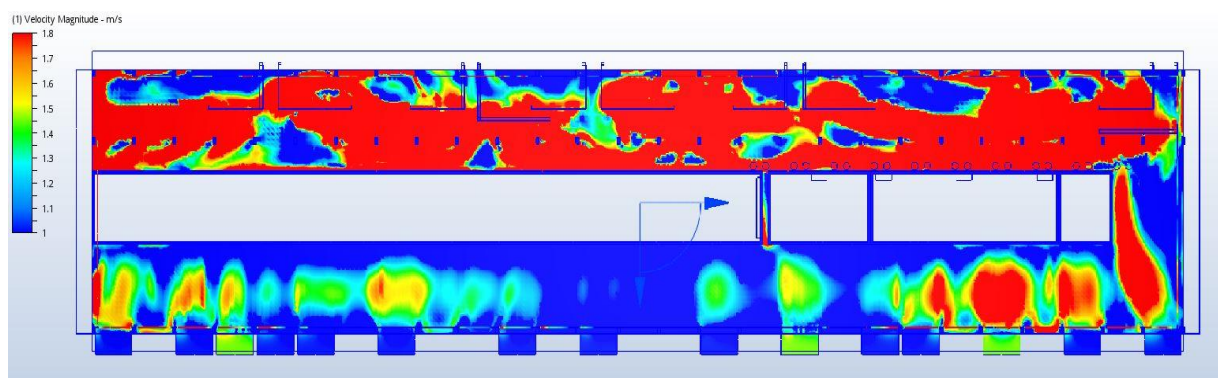
b) Testi 2.12. Ilman nopeus katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 0–1,2 m/s



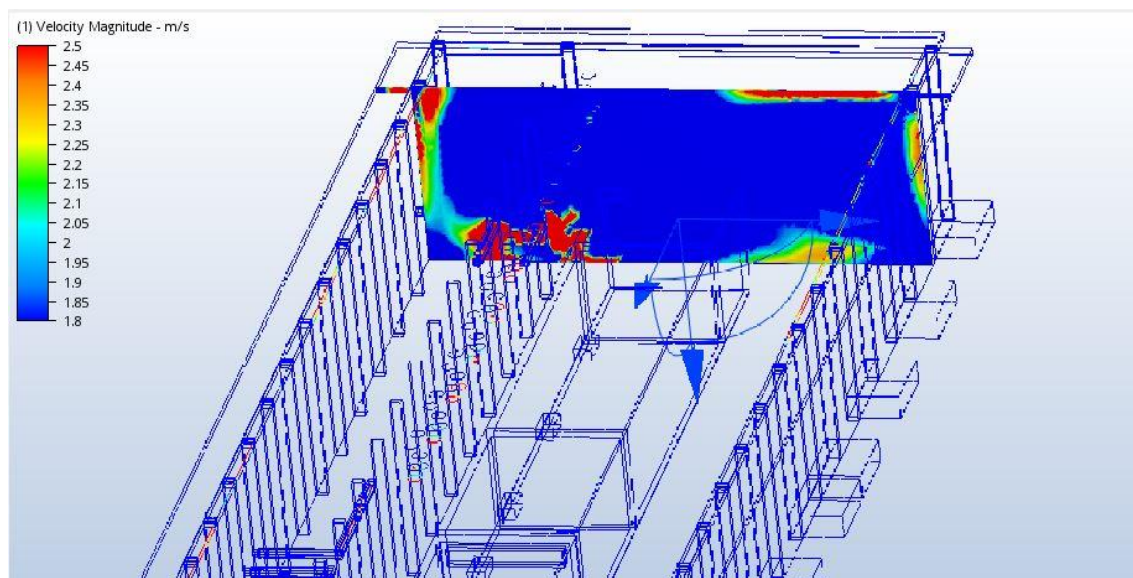
c) Testi 2.17. Ilman nopeus 1,8 metrissä asteikolla 0,5–1,5 m/s



d) Testi 2.17. Ilman nopeus 1,8 metristä ja vaakaleikkaus käyttöpuolelta asteikolla 1–10 m/s.

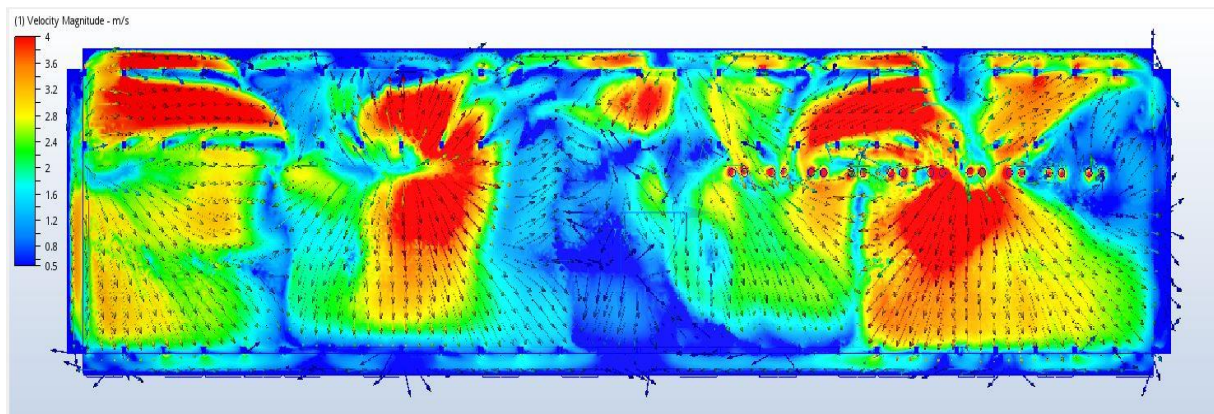


e) Testi 2.17. Ilman nopeus 1,8 metristä asteikolla 1–1,8 m/s.

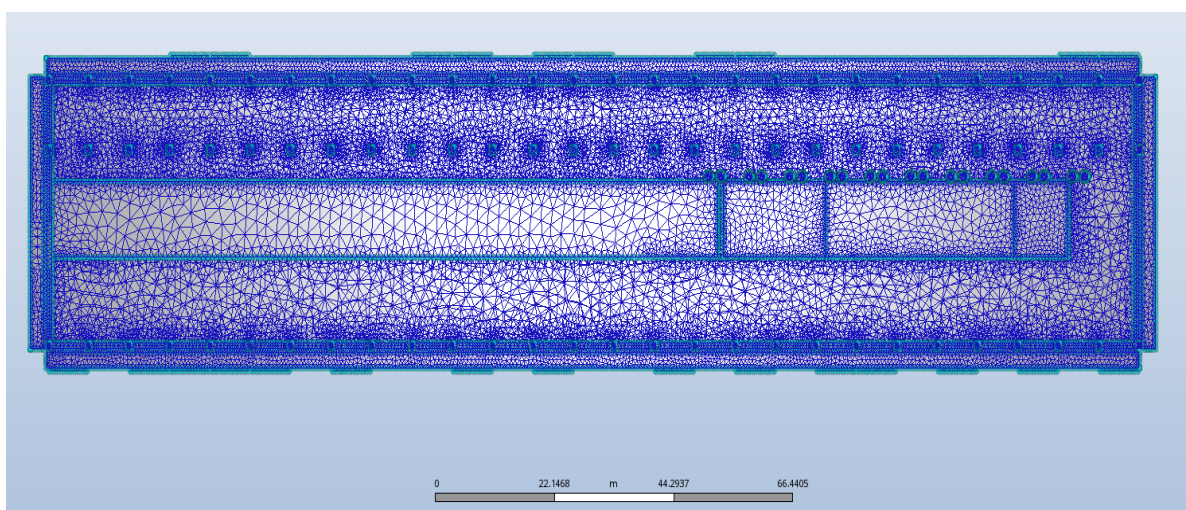


f) Testi 2.17. Ilman nopeus salin oikeapuoli asteikolla 1,8–2,5 m/s.

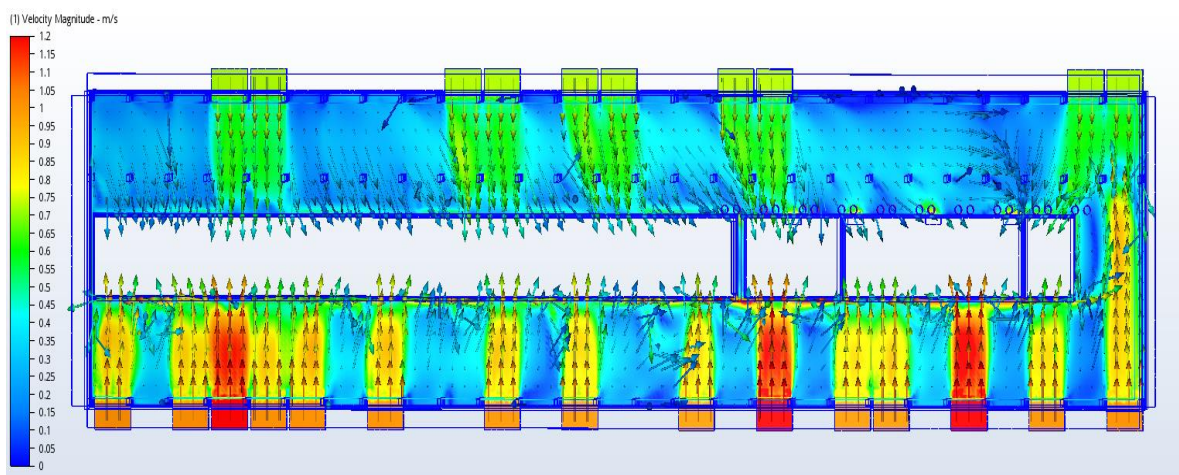




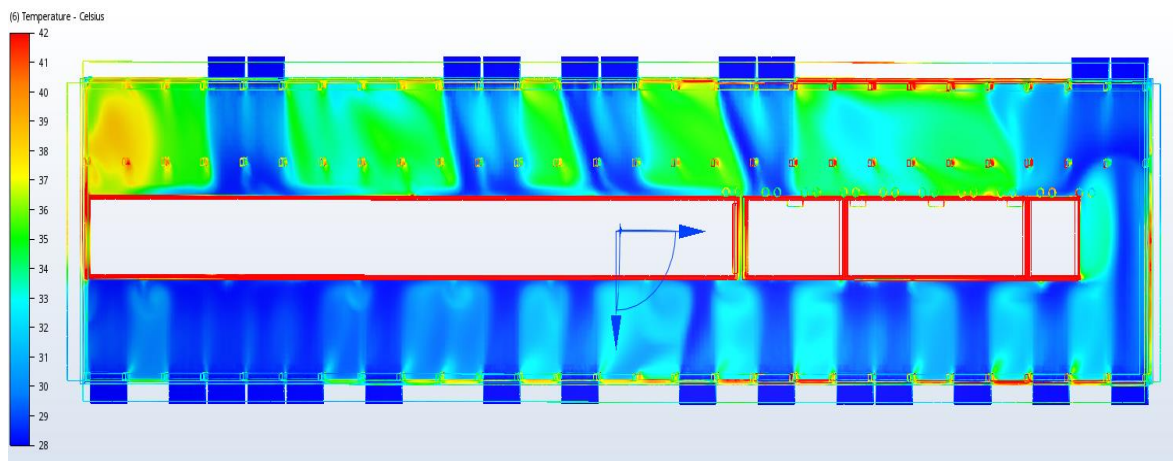
g) Testi 2.17. Ilman nopeus katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 0,5–4 m/s



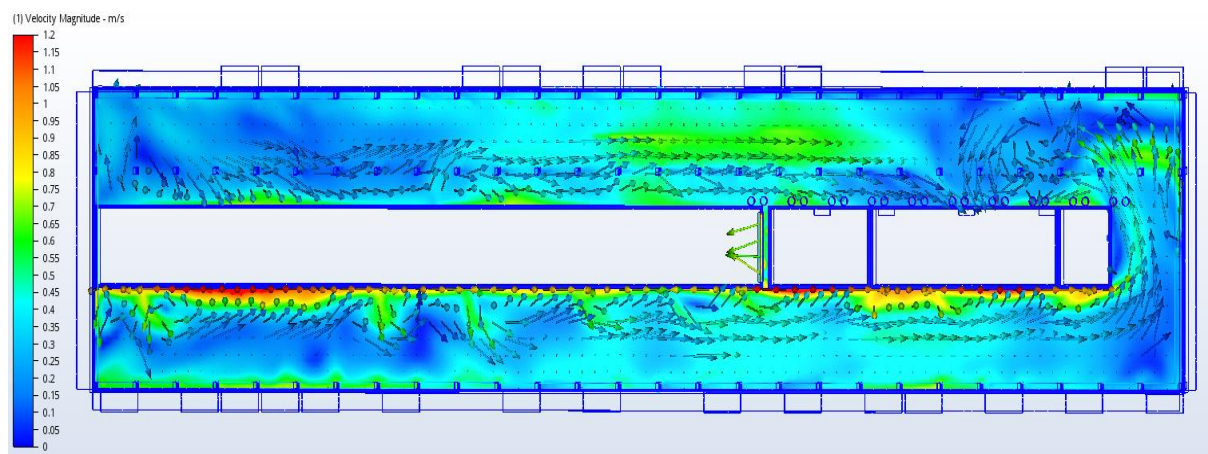
h) Testi 2.26. Kuva laskentahilasta



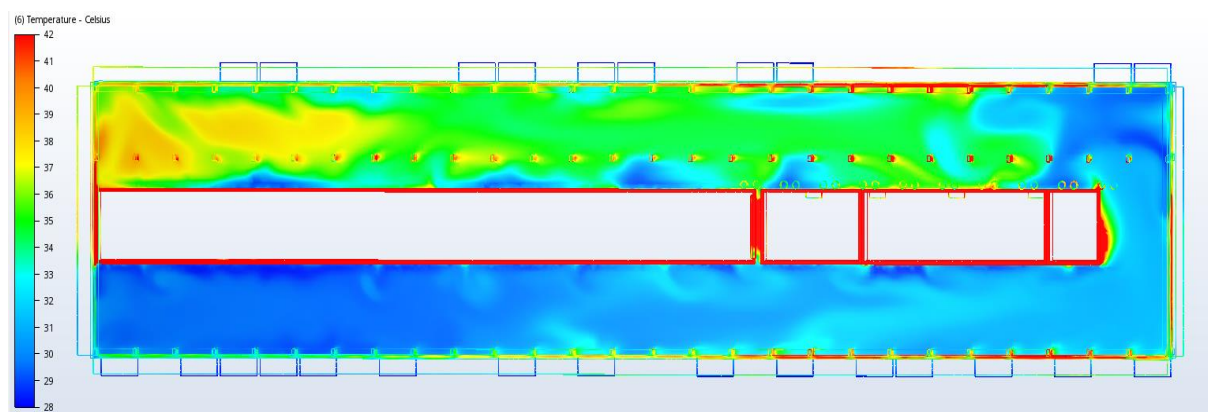
i) Testi 2.26. Ilman nopeus 1,8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s



j) Testi 2.26. Ilman lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 28–42 °C

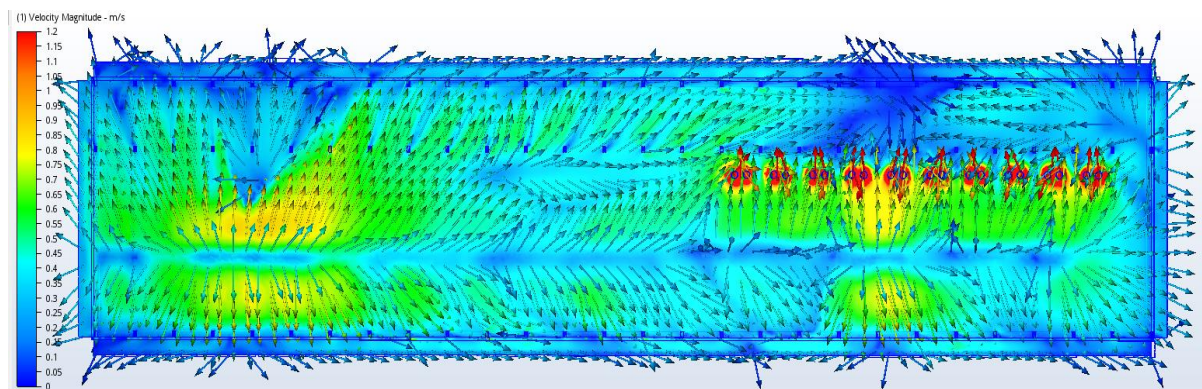


k) Testi 2.26. Ilman nopeus 8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s

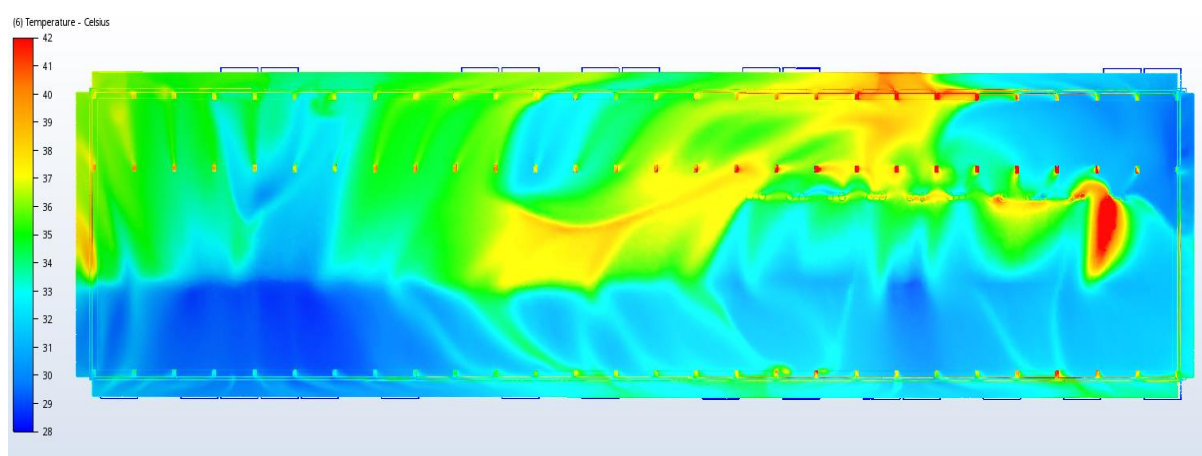


l) Testi 2.26. Ilman lämpötila 8 metrissä asteikolla 28–42 °C

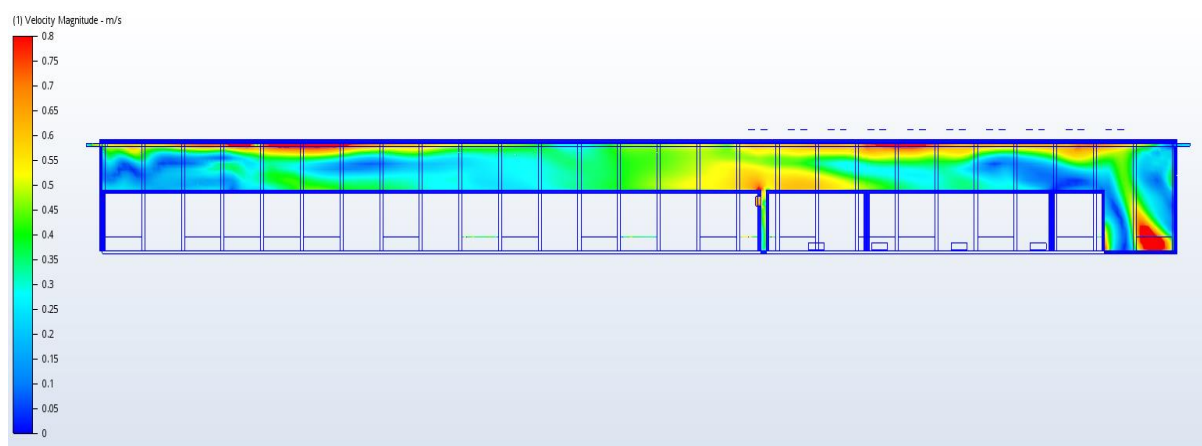




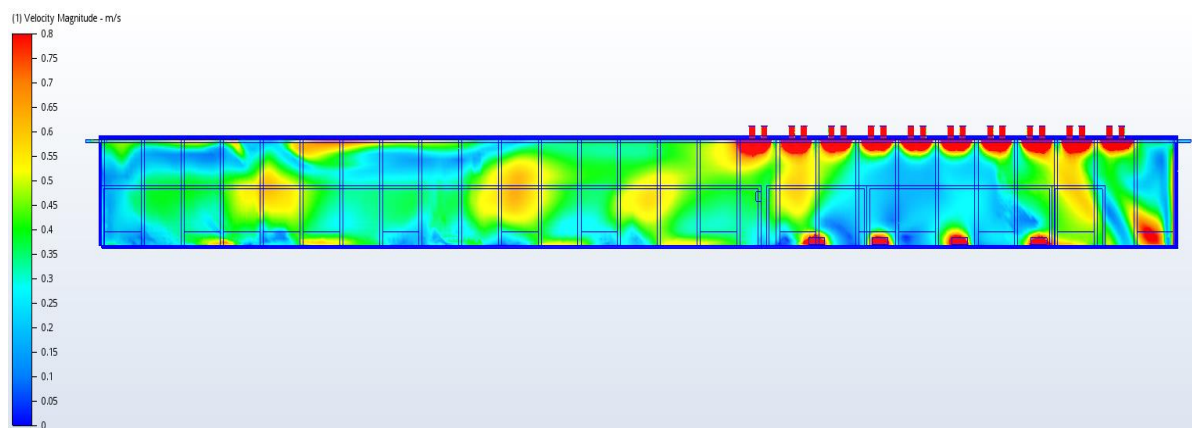
m) Testi 2.26. Ilman nopeus katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 0–1,2 m/s



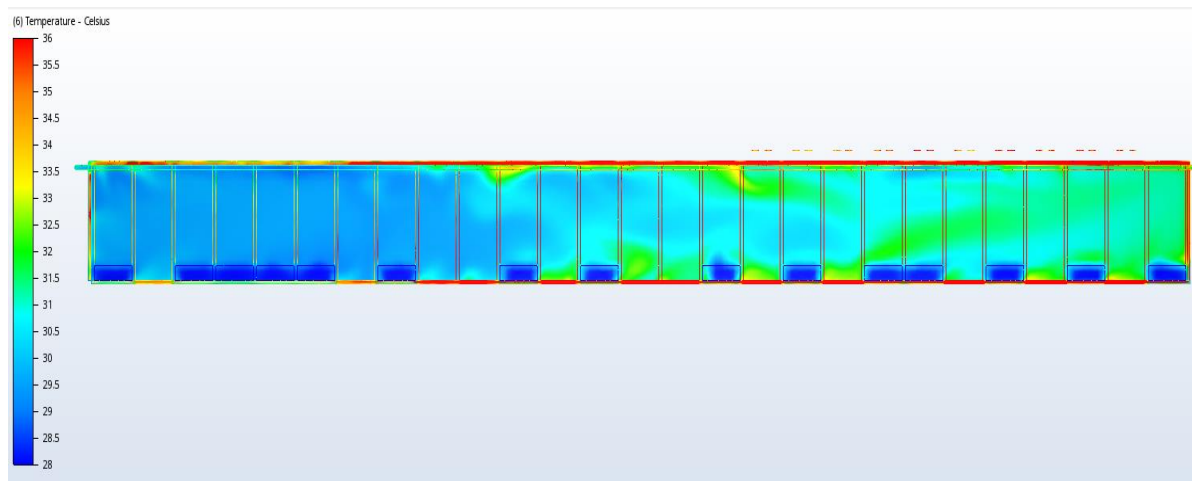
n) Testi 2.26. Ilman lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 28–42 °C



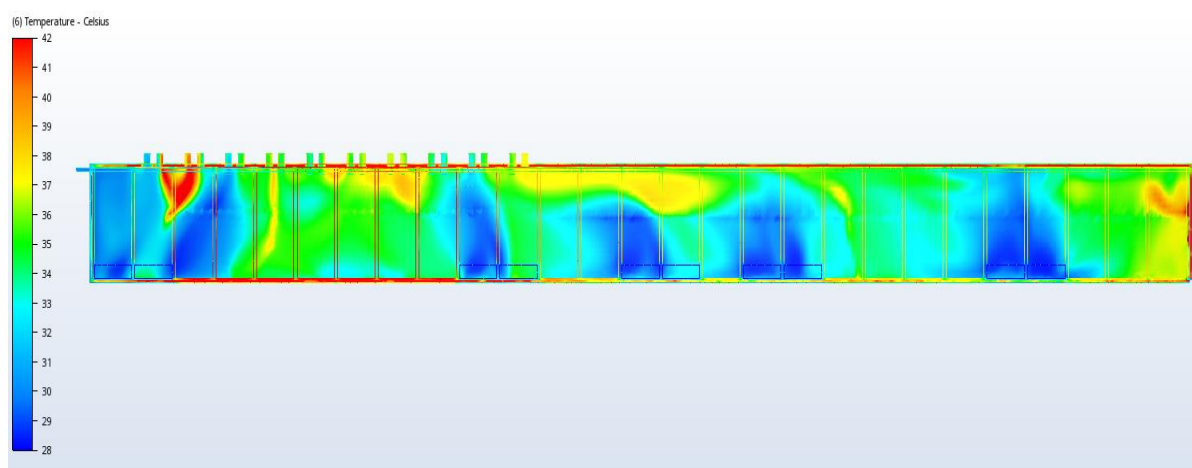
o) Testi 2.26. Ilman nopeus y-leikkaus keskeltä salia asteikolla 0–0,8 m/s



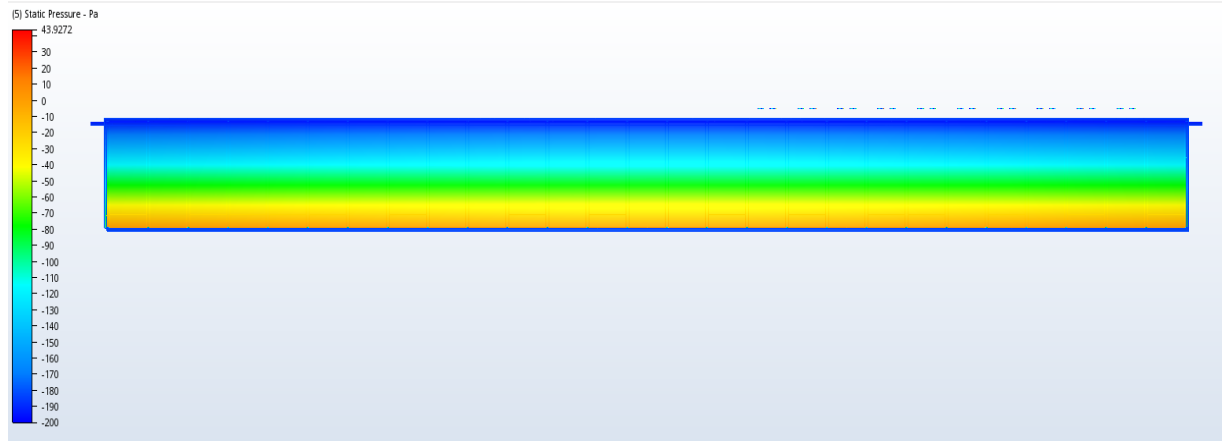
p) Testi 2.26. Ilman nopeus y-leikkaus poistoilmojen kohdalta asteikolla 0–0,8 m/s



q) Testi 2.26. Ilman lämpötila y-leikkaus hoitopuolelta asteikolla 28–36 °C



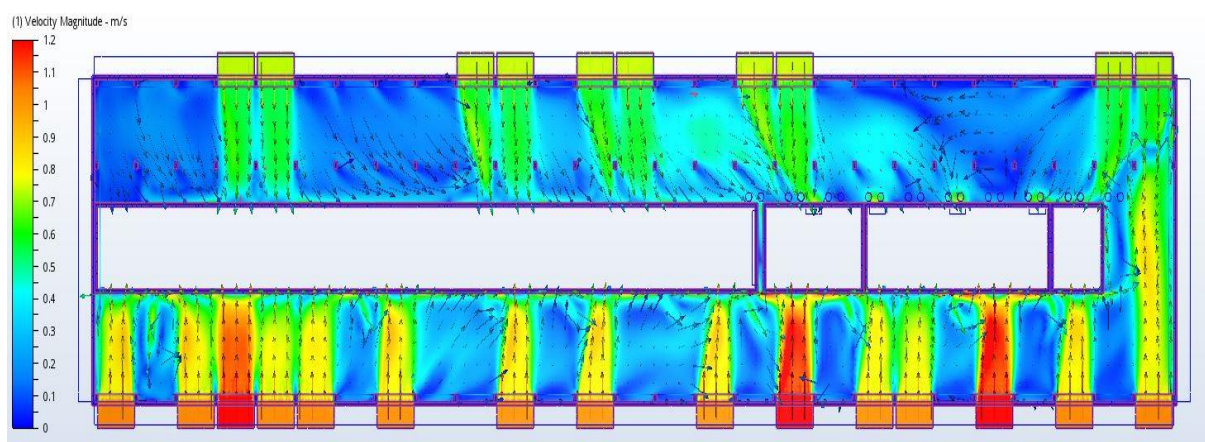
r) Testi 2.26. Ilman lämpötila y-leikkaus käyttöpuolelta asteikolla 28–42 °C



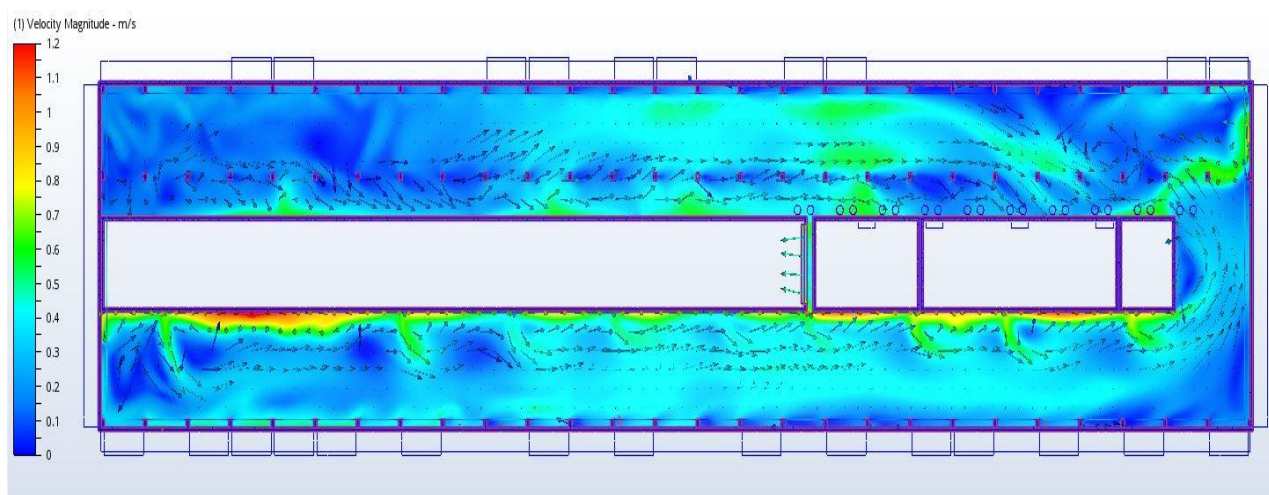
s) Testi 2.26. Staattinen paine y-leikkaus hoitopuolelta



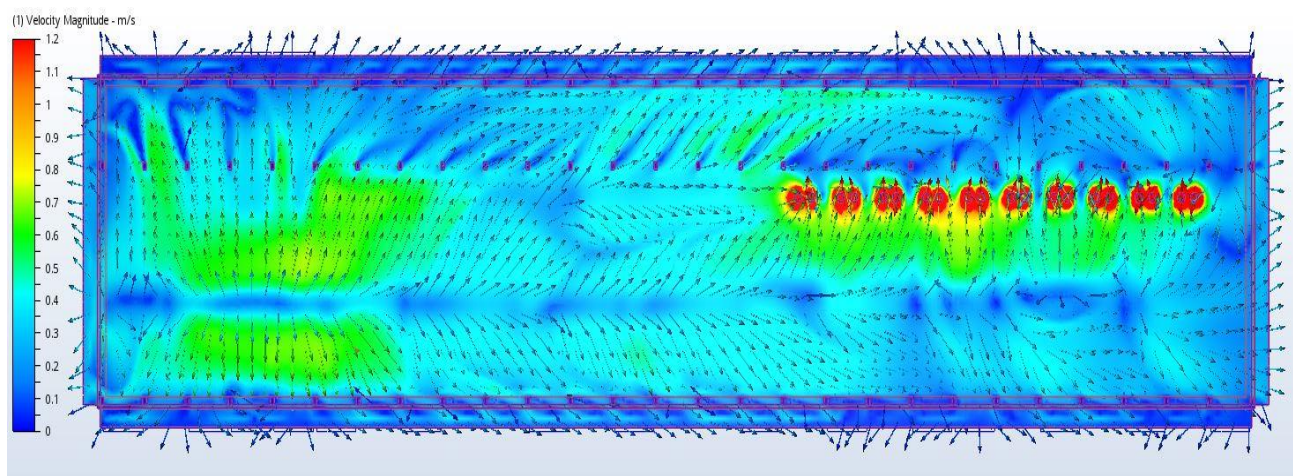
## Lämpökuormasimulointi



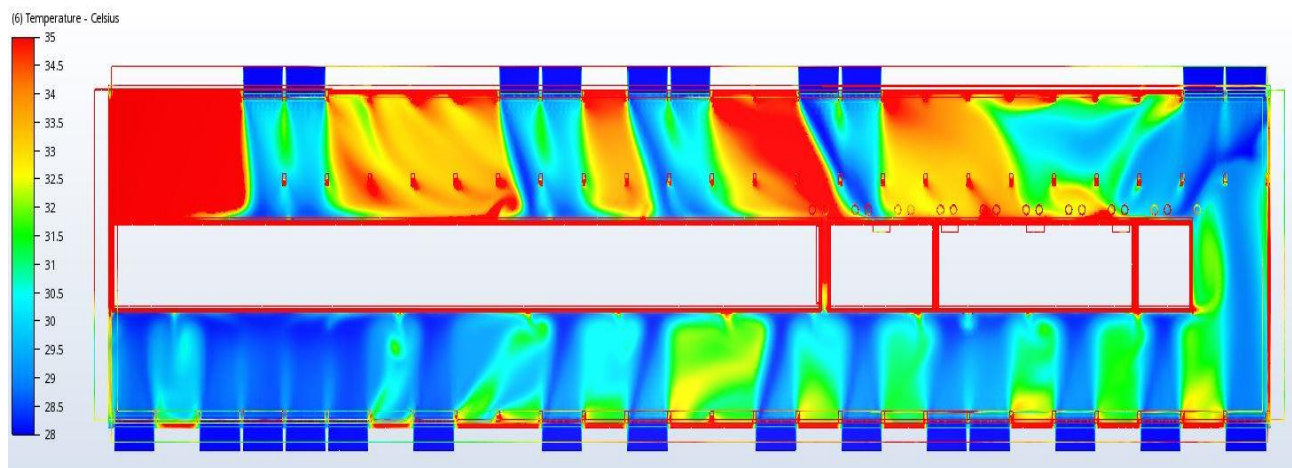
a) Lämpökuormasimulointi. Ilman nopeus 1,8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s.



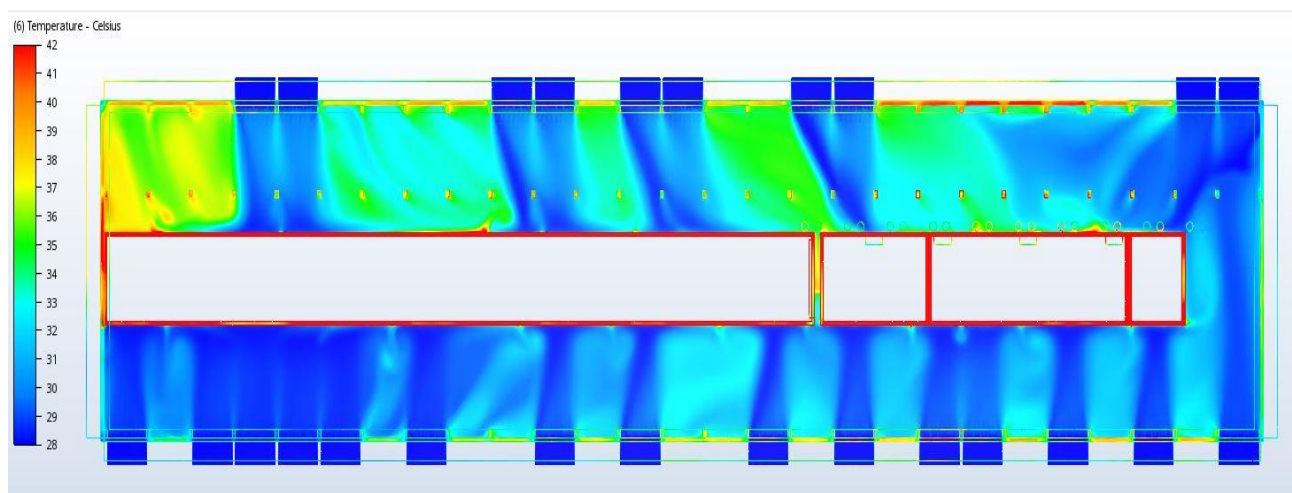
b) Lämpökuormasimulointi. Ilman nopeus 8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s.



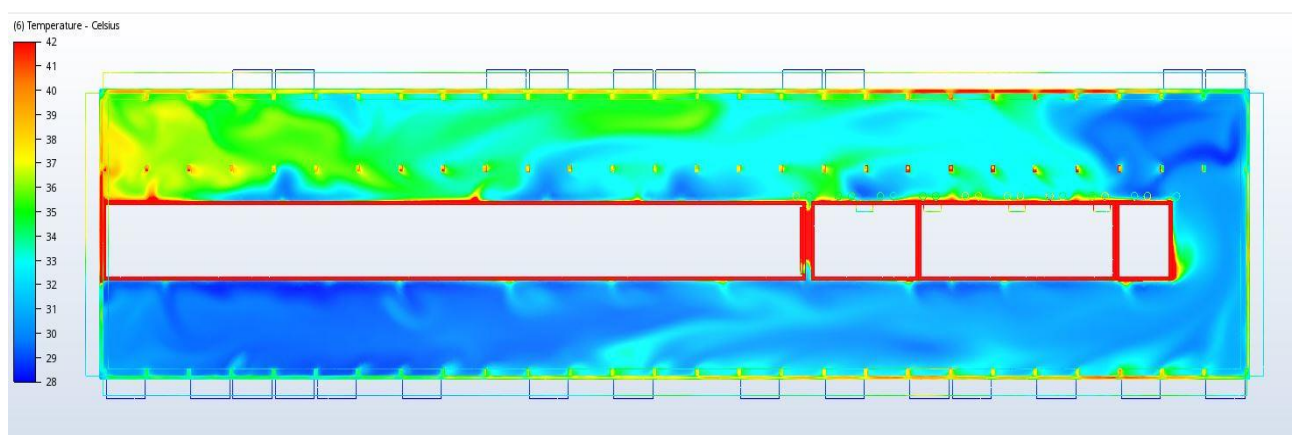
c) Lämpökuormasimulointi. Ilman nopeus katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 0–1,2 m/s.



d) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 28–35 °C

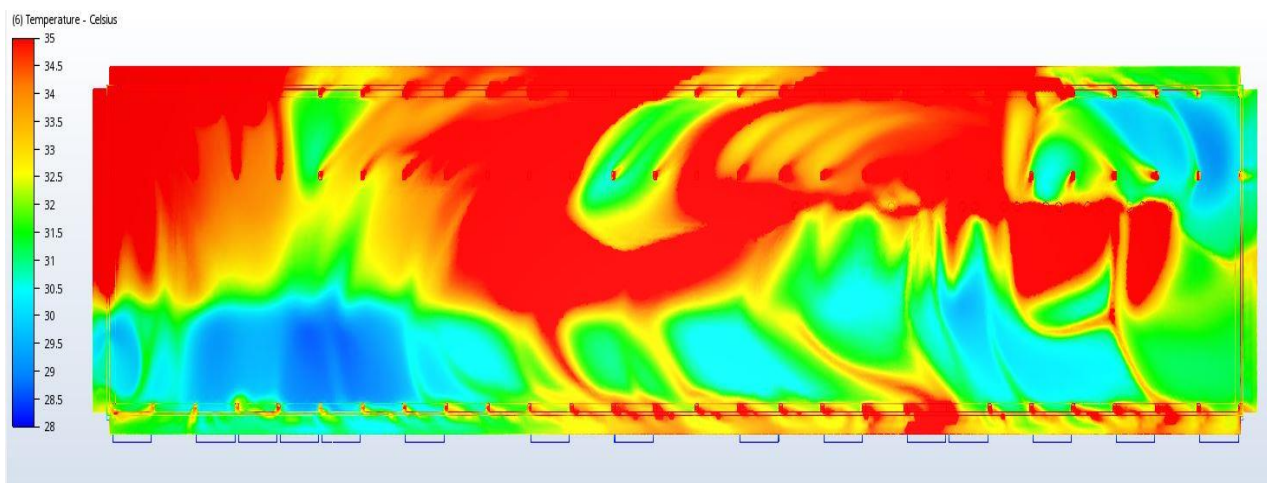


e) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 28–42 °C

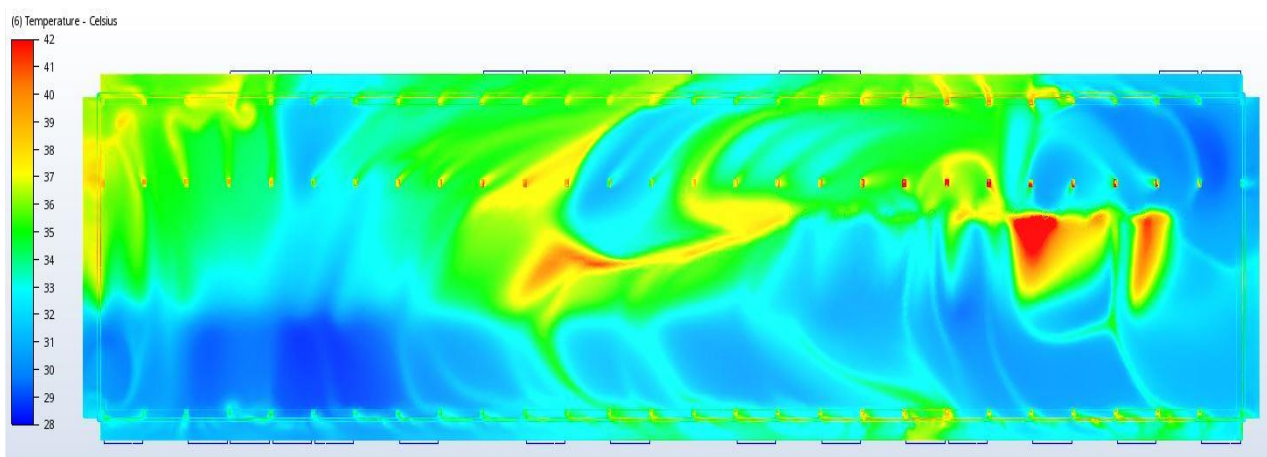


f) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila 8 metrissä asteikolla 28–42 °C

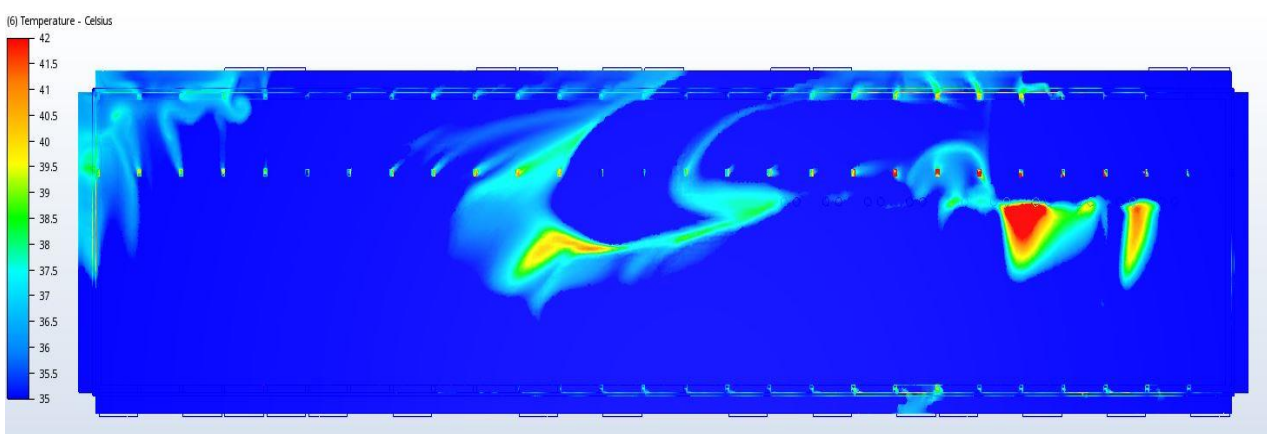




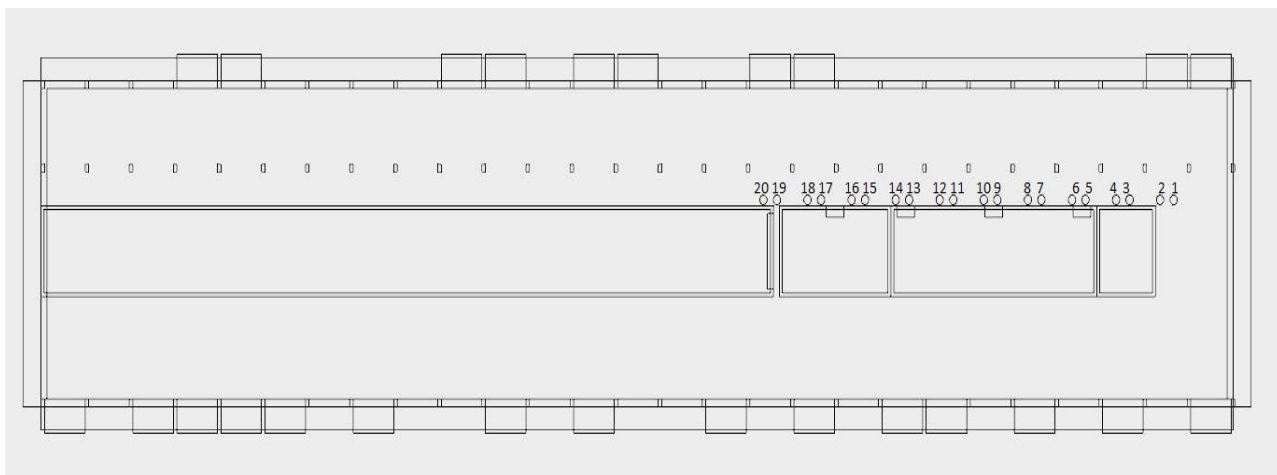
g) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 28–35 °C



h) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 28–42 °C



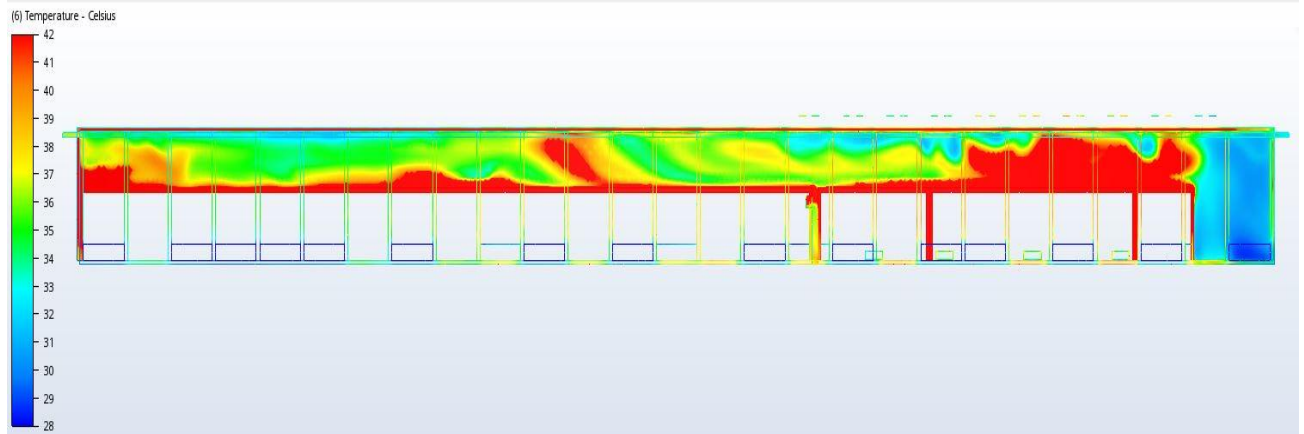
i) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 35–42 °C



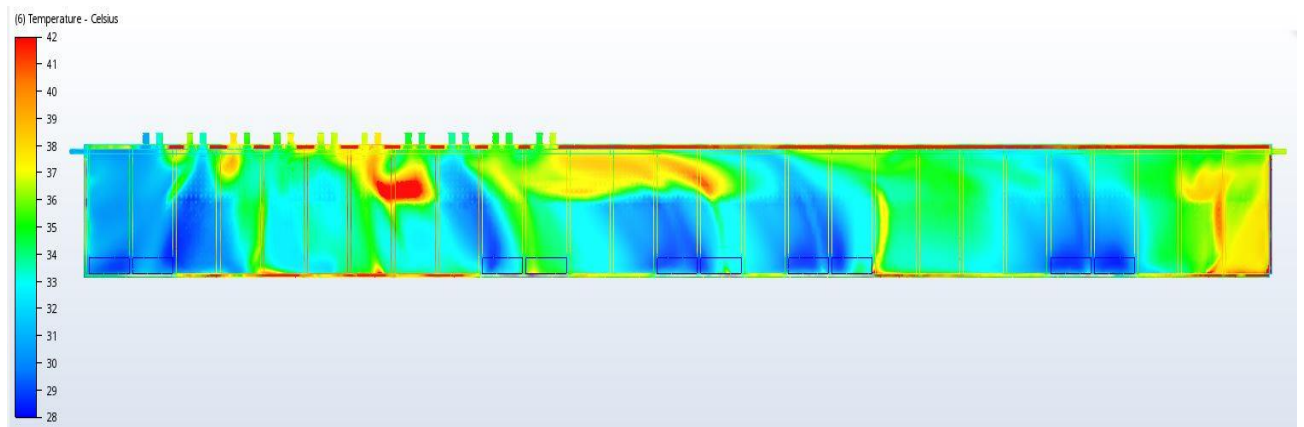
j) Lämpökuormasimulointi. Numeroidut poistoilma-aukot.

NRO	Lämpötila [°C]	NRO	Lämpötila [°C]
1	30,8831	11	37,4655
2	33,1522	12	38,7739
3	35,9599	13	35,1373
4	33,4698	14	34,7355
5	38,6506	15	33,147
6	35,0353	16	34,5153
7	34,8463	17	35,6269
8	37,2773	18	35,1454
9	36,177	19	34,9122
10	36,8484	20	36,7154

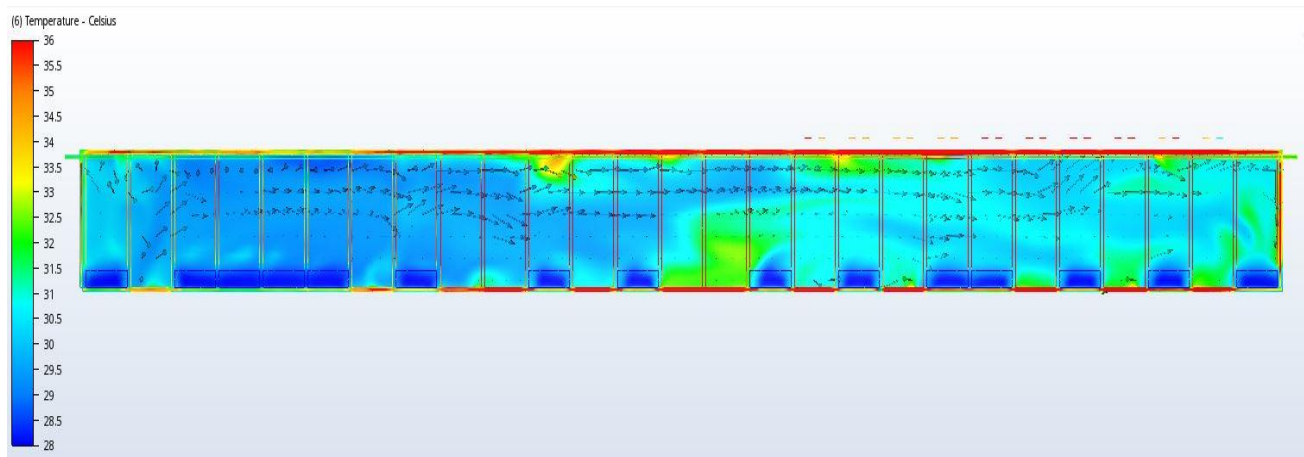
k) Lämpökuormasimulointi. Poistoilman lämpötila kanavasta salin puoleisesta pinnasta.



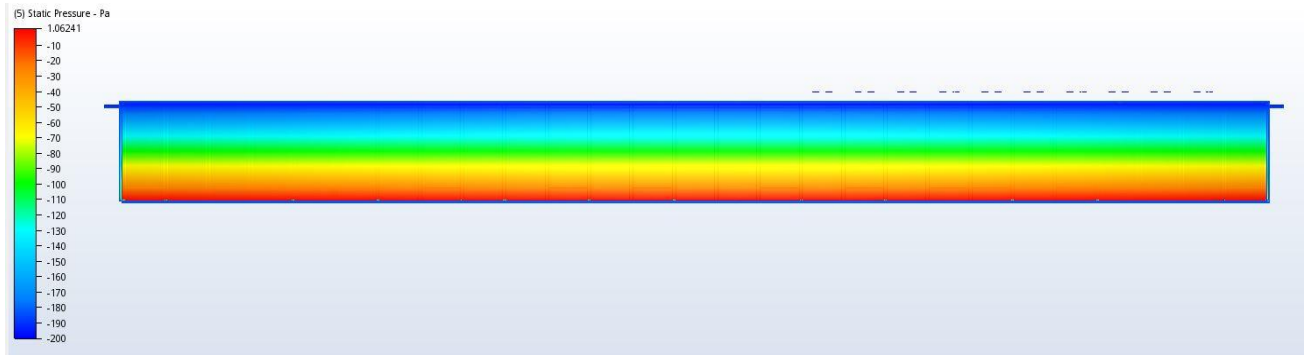
l) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila-leikkaus keskeltä salia asteikolla 28–42 °C



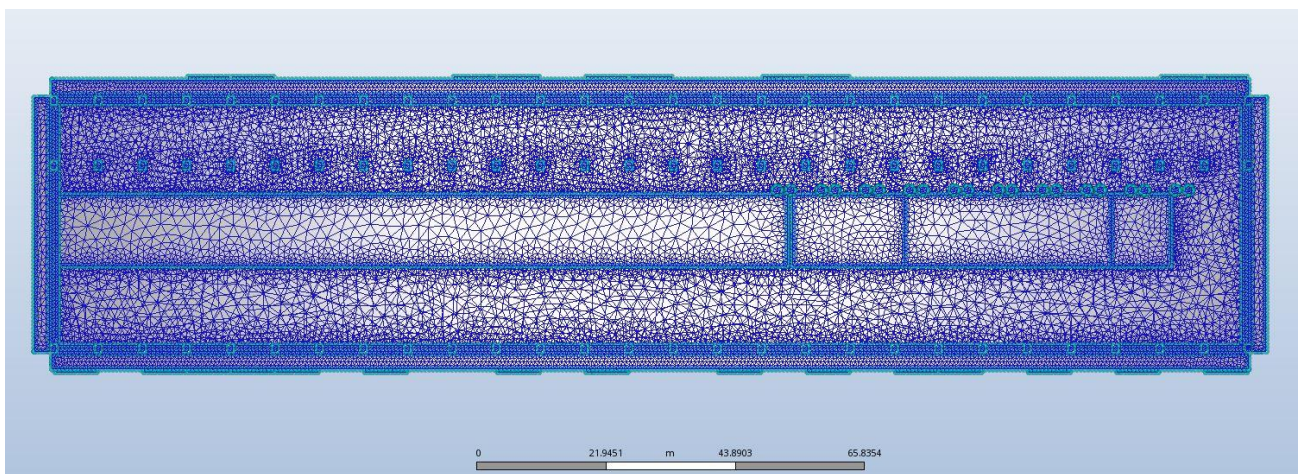
m) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila-leikkaus käyttöpuolelta poistoilmojen kohdalta asteikolla 28–42 °C



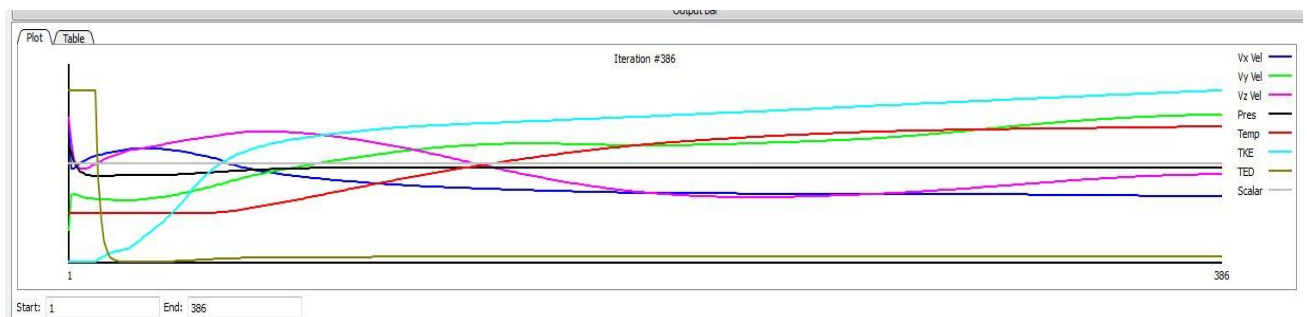
n) Lämpökuormasimulointi. Lämpötila-leikkaus hoitopuolelta keskeltä käytävää asteikolla 28–35 °C



o) Lämpökuormasimulointi. Salissa vallitseva staattinen paine, leikkaus hoitopuolen käytävän keskeltä. Skaalaus -200...1,06241 Pa



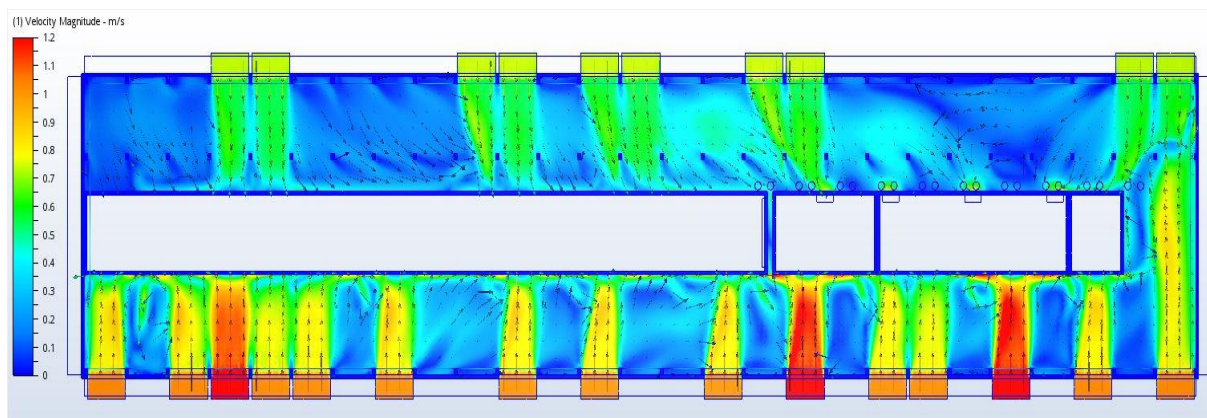
p) Lämpökuormasimulointi. Kuva laskentahilasta



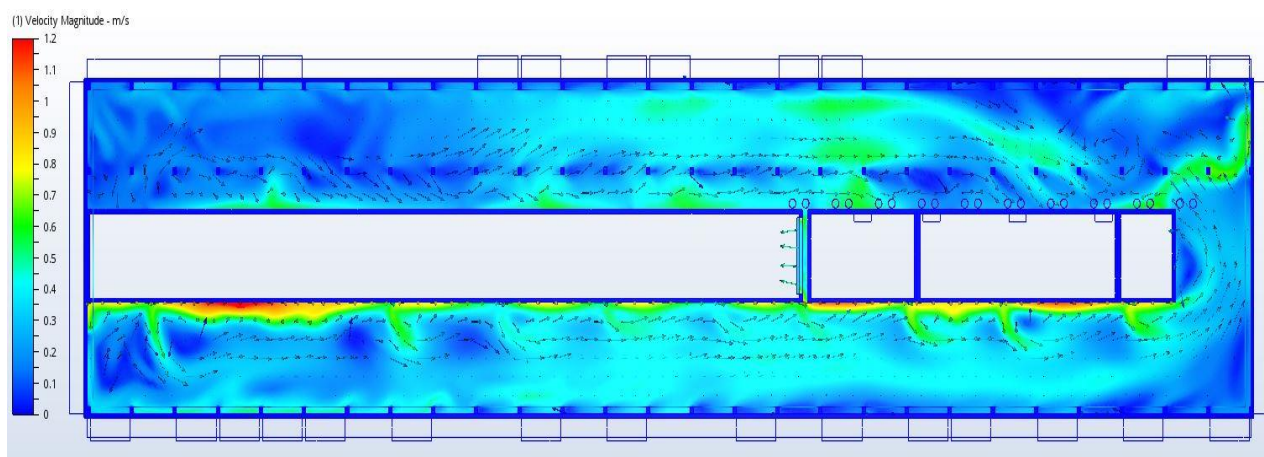
q) Lämpökuormasimulointi. Iterointisuorat



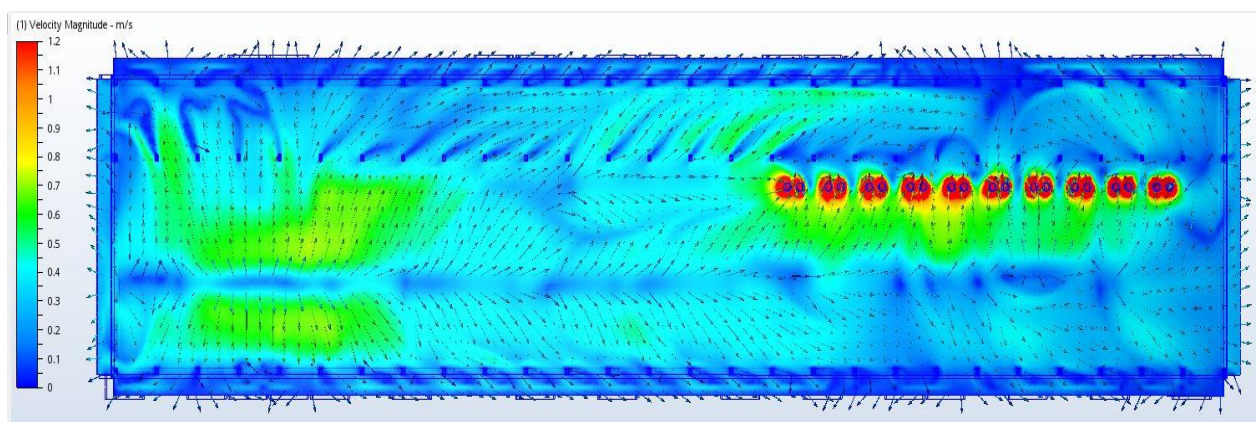
## Tuloilman lämpötilan 20 °C



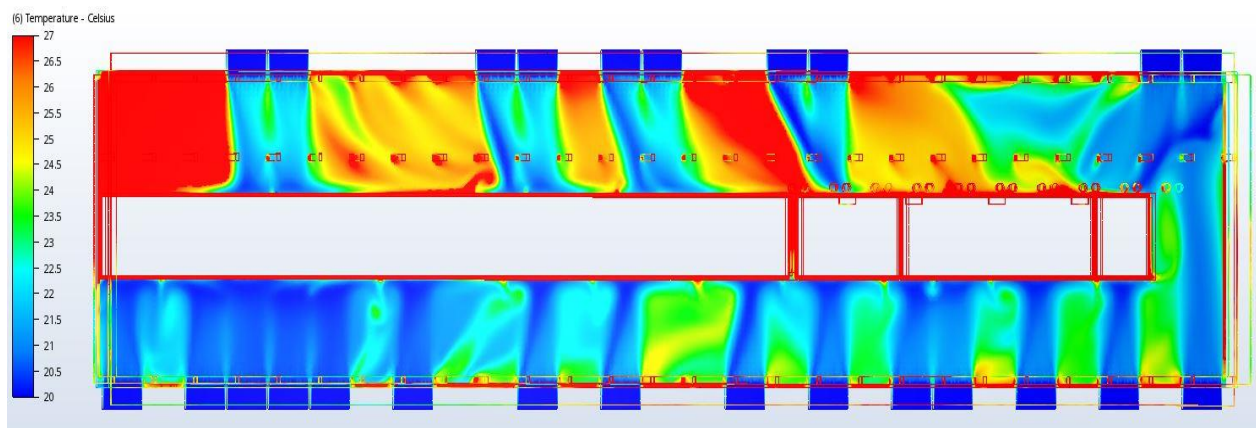
a) Tuloilman lämpötila 20 °C. Ilman nopeus 1,8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s



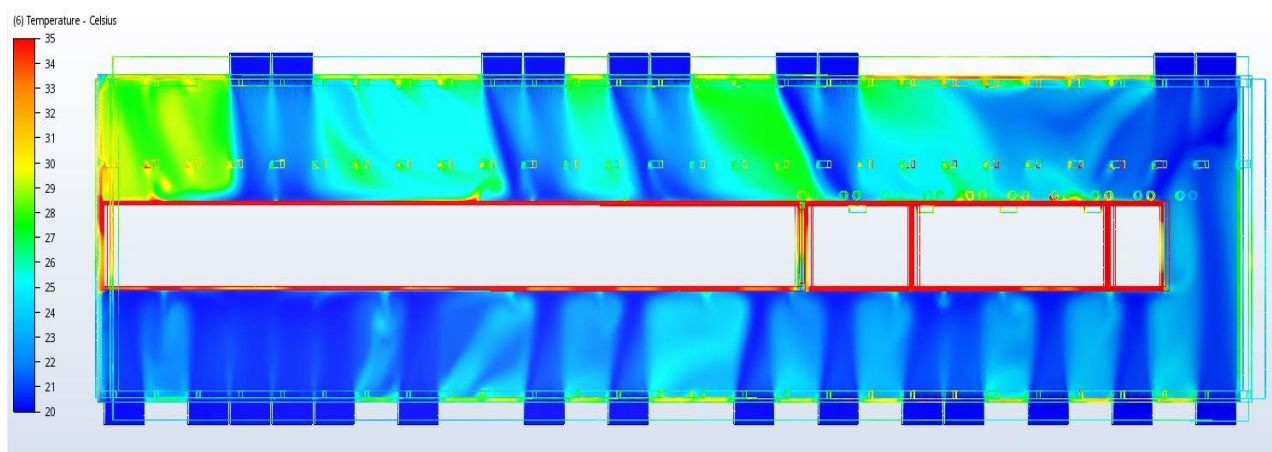
b) Tuloilman lämpötila 20 °C. Ilman nopeus 8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s



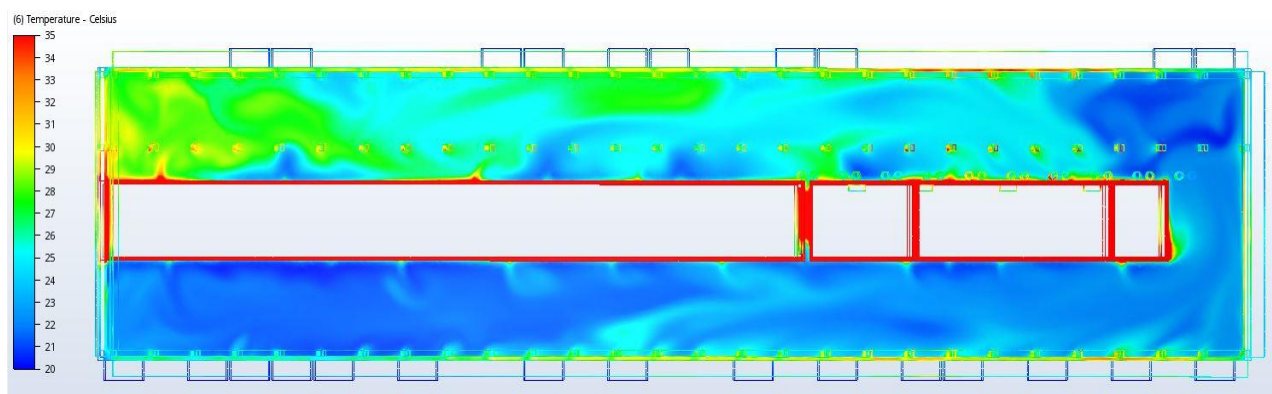
c) Tuloilman lämpötila 20 °C. Ilman nopeus katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 0–1,2 m/s



d) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 20–27 °C

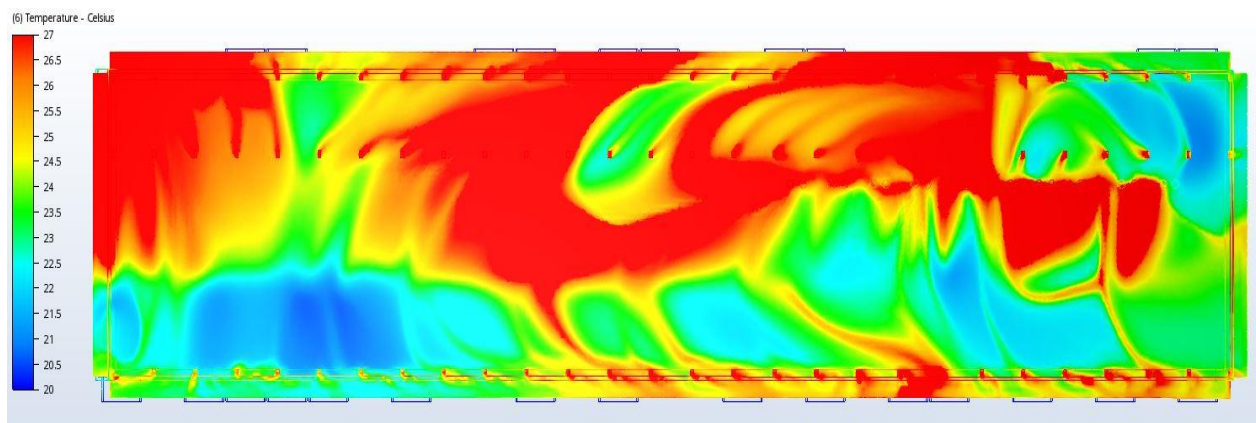


e) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 20–35 °C

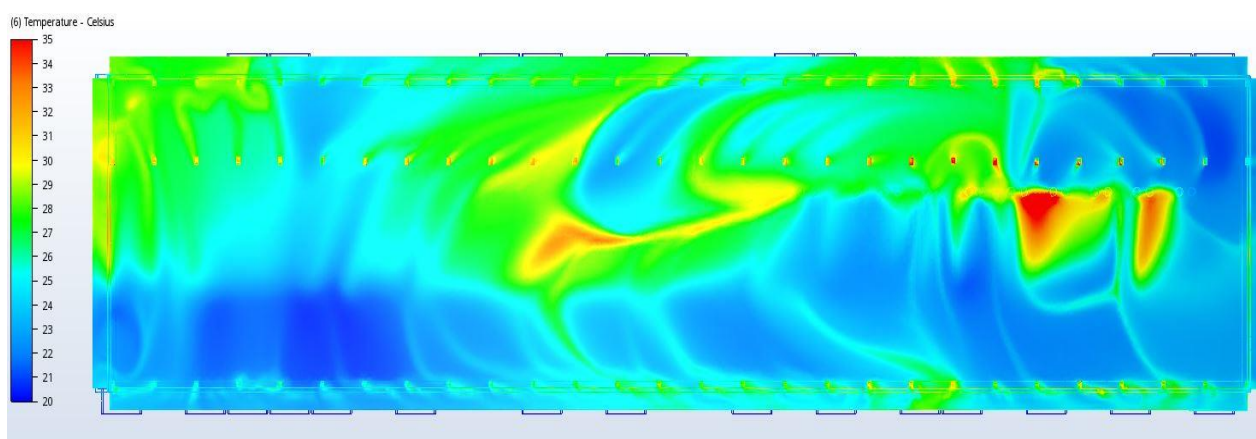


f) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila 8 metrissä asteikolla 20–35 °C

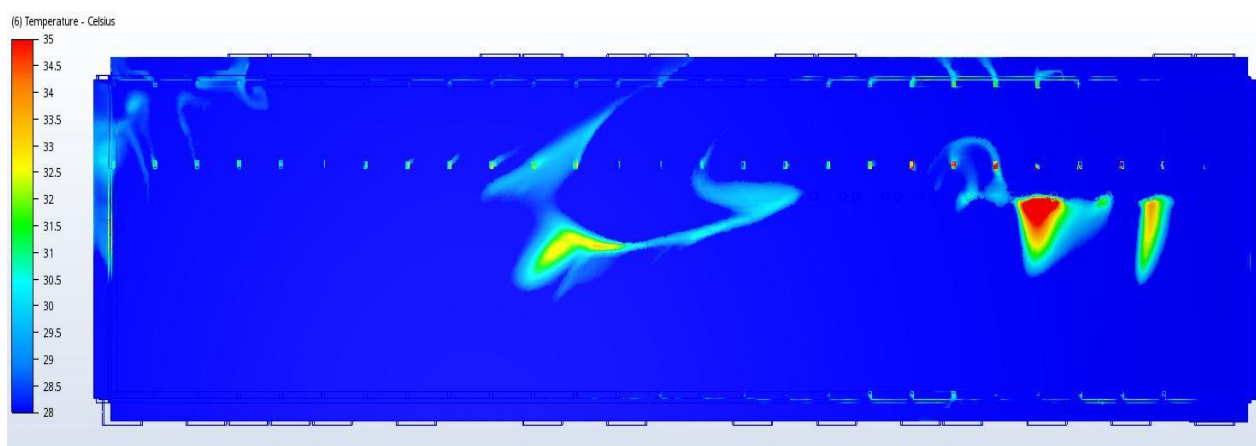




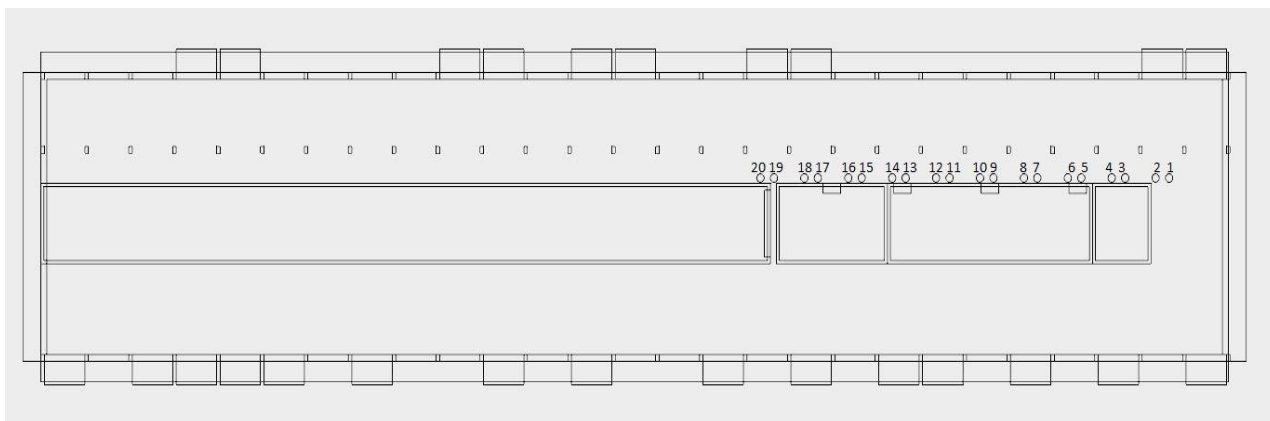
g) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 20–27 °C



h) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 20–35 °C



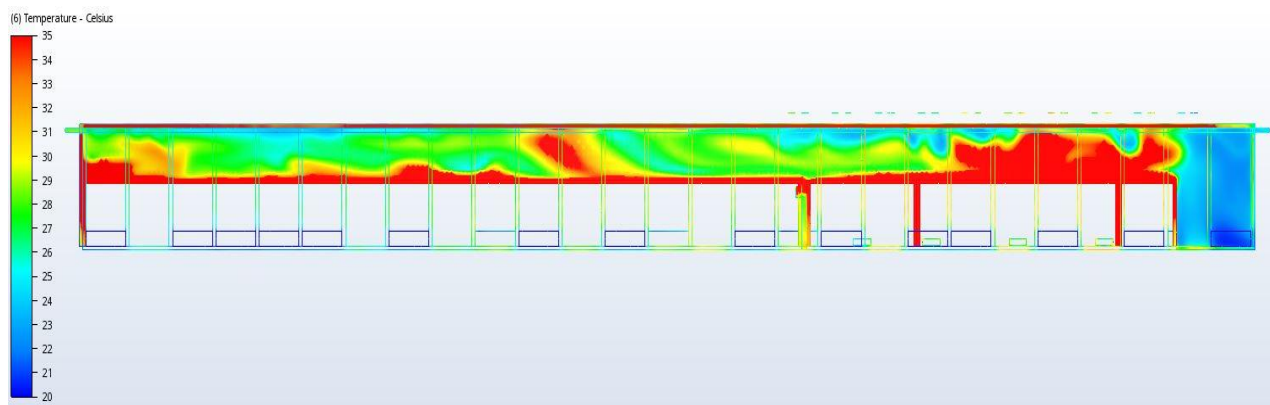
i) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 28–35 °C



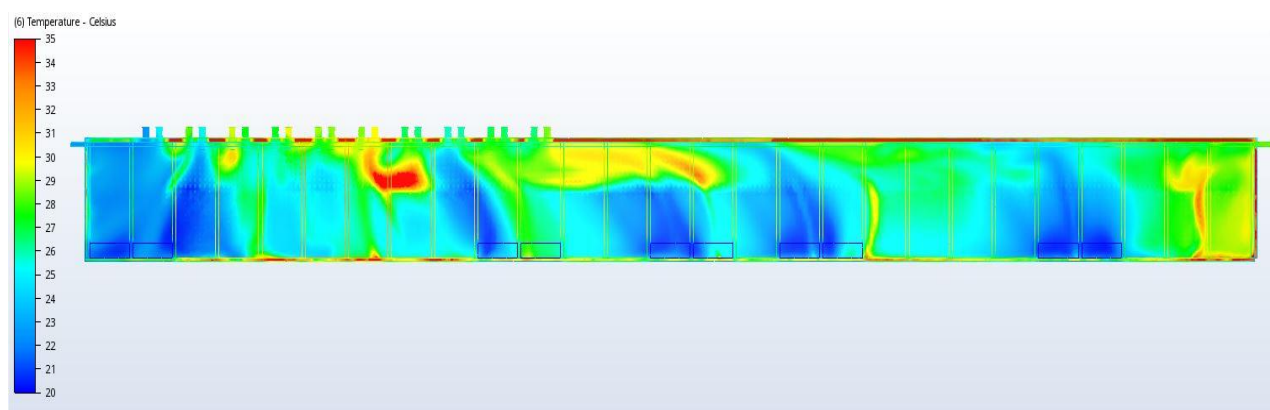
j) Tuloilman lämpötila 20 °C. Numeroidut poistoilma-aukot.

NRO	Lämpötila [°C]	NRO	Lämpötila [°C]
1	22,72	11	29,3873
2	24,8406	12	31,0368
3	27,664	13	27,166
4	25,344	14	26,748
5	30,2962	15	26,5518
6	27,2626	16	25,4057
7	26,877	17	27,5772
8	30,2392	18	27,2585
9	28,3449	19	26,8475
10	28,8691	20	28,6835

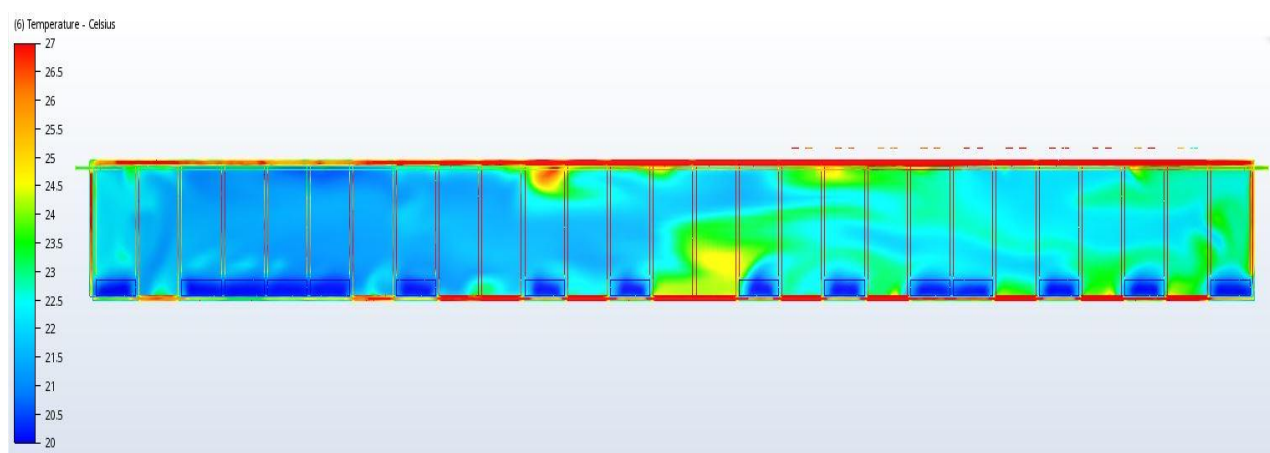
k) Tuloilman lämpötila 20 °C. Poistoilman lämpötila kanavasta salin puoleisesta pinnasta.



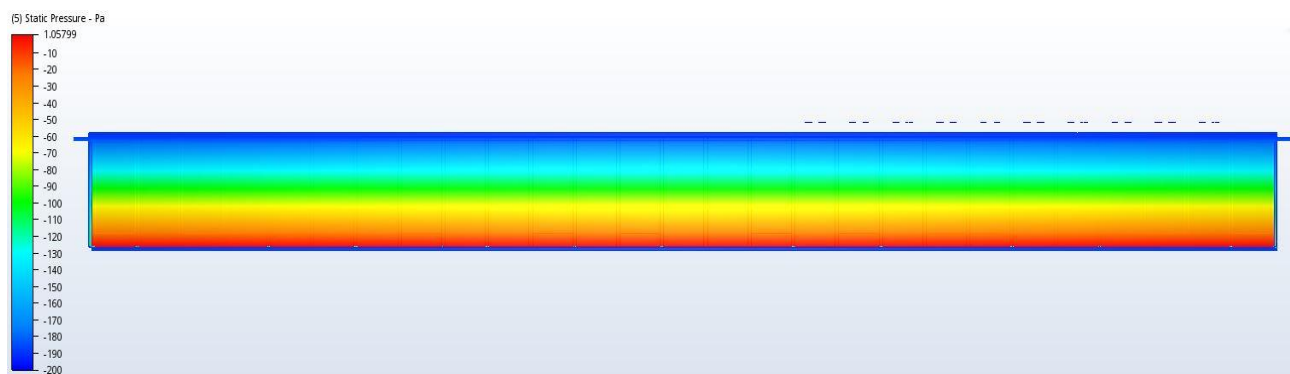
l) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila-leikkaus keskeltä salia asteikolla 20–35 °C



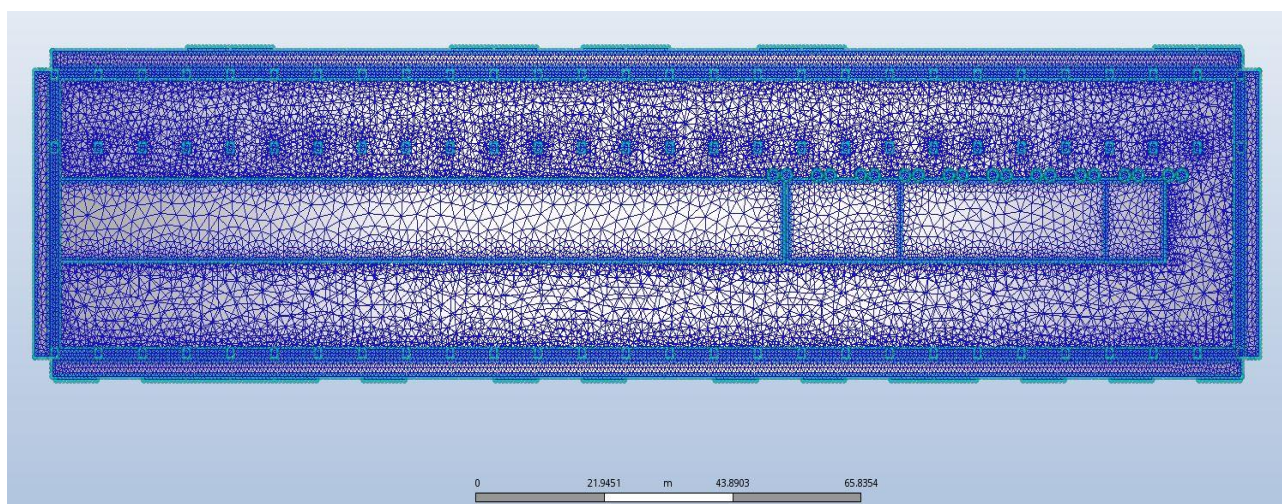
m) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila-leikkaus käyttöpuolelta poistoilmojen kohdalta asteikolla 20–35 °C



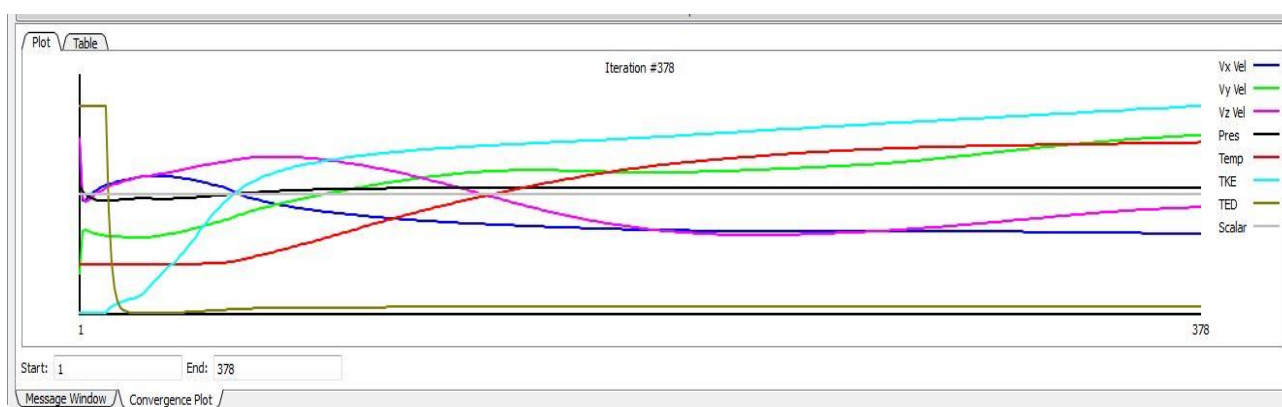
n) Tuloilman lämpötila 20 °C. Lämpötila-leikkaus hoitopuolelta keskeltä käytävää asteikolla 28–27 °C



o) Lämpökuormasimulointi. Salissa vallitseva staattinen paine, leikkaus hoitopuolen käytävän keskeltä. Skaalaus -200...1,05799 Pa



p) Tuloilman lämpötila 20 °C. Kuva laskentahilasta



q) Tuloilman lämpötila 20 °C. Iterointisuorat

## Tuloilmalaitteiston muutokset

Taulukko. Simulaation reunaehdot.

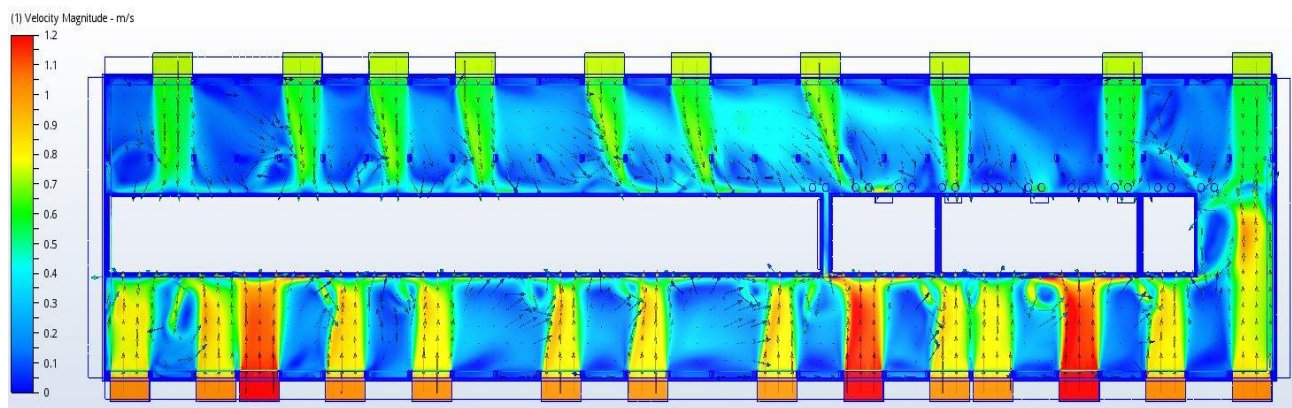
POISTOILMA						Määrä [kg/s]	suhde			
Viira- ja puristinosan poistot				Prosessi		37	0,100		Käytetään	Yhteensä
	Poistoja simulaatiossa 4 kpl					9,2			[kg/s]	[kg/s]
Kuivatusosan poistot, huuva				Prosessi		11,0	0,030		11	
										48,2
Märänpään poisto				Halli		296	0,805			
						344,1				
Vuotoilma						23,9	0,065			24
	4	Ile sivulle				6,0			6	
Yhteensä						368	1,000			
Poistoilmakanavia määrässä päässä		20	kpl						14,8	
Yhden kanava poistoilmamäärä						14,8	kg/s		296	368,2
						368				
<b>TULOILMA (KUIVAA ILMAA)</b>										
Tuloilmamäärä määrävä tekijä										
Tuloilman lämpötila	28	°C		Tiheys	1,172	kg/m <sup>3</sup>				
Kellaritilassa 40 m <sup>3</sup> /s tuloilmakoneita, 20 m <sup>3</sup> /s käyttötasolle										
<b>Hoitopuoli</b>										
Määrä, seinäkone			11	kpl					Käytetään	
	20 m <sup>3</sup> /s koneita, 70 % käyttötasolle									
	1 kpl		14	m <sup>3</sup> /s	16,4	kg/s			16,4	
			154	m <sup>3</sup> /s	180,5	kg/s				180,4
Määrä, kellarikone			3	kpl	4-5, 9-10, 22-23		3, 6 ja 3-v			
	20 m <sup>3</sup> /s käyttötasolle									
	1kpl		20	m <sup>3</sup> /s	23,4	kg/s			23,6	
			60	m <sup>3</sup> /s	70,3	kg/s				70,8
<b>Käyttöpuoli</b>										
Määrä, LTO tason kone			5	kpl						
	20 m <sup>3</sup> /s käyttötasolle		20	m <sup>3</sup> /s						
			100	m <sup>3</sup> /s	117,2	kg/s				
	Seinäkanavia		10	kpl						
			10	m <sup>3</sup> /s	11,7	kg/s			11,7	117
YHTEENSÄ			314	m <sup>3</sup> /s	368,0	kg/s				368,2

Jatkuu

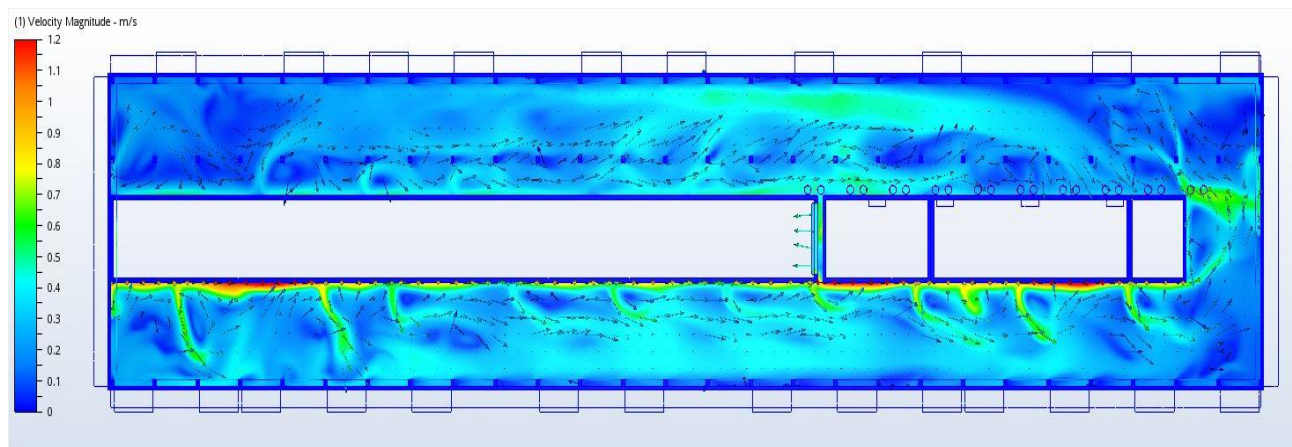


<b>Tuloilman nopeus</b>		
Leveys	6,9	m
Korkeus	2	m
Ala	13,8	m <sup>2</sup>
Ilmamäärä [m <sup>3</sup> /s]	Nopeus [m/s]	
10	0,72	
14	1,01	
20	1,45	

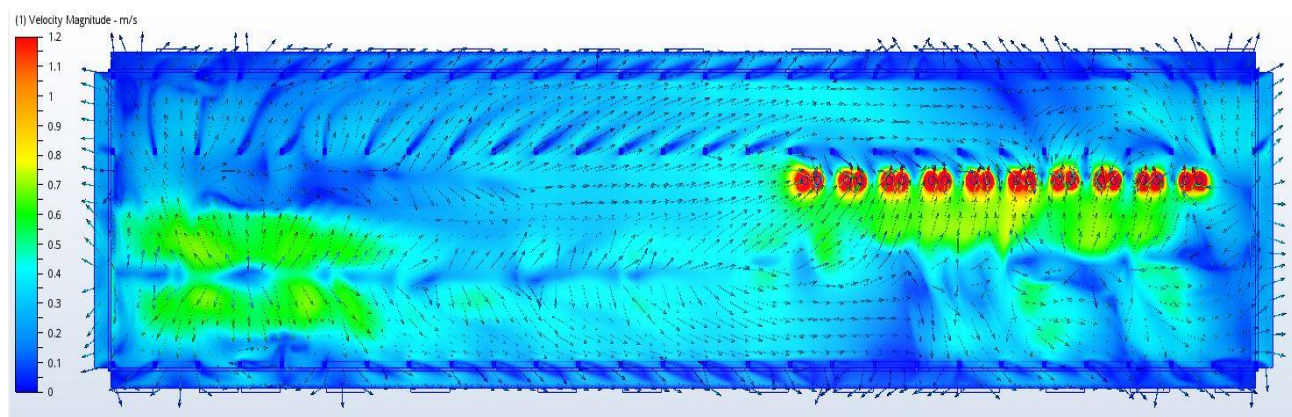
<b>LÄMPÖKUORMA</b>						
Otetaan koko lämpökuormasta 70 % käyttötasolle					kW	
Viiraosan kuormat					1700	
	Käyttötasolle	70			<b>1190</b>	
	Kellariin	30			510	
Kuivatusosan kuormat					1500	
	Käyttötasolle	70			<b>1050</b>	
	Kellariin	30			450	
	Yhteensä					
	Käyttötasolle	70			<b>2240</b>	
	Kellariin	30			960	
Lämpökuormat jaetaan koneeseen suhteessa 70% päälle, 15 % molemmille sivuille						
				70	15 %	
	Viiraosa			833	179 kw	
		geometria 3 osassa		278	60	
	Kuivatusosa			735	158 kw	
					kw	



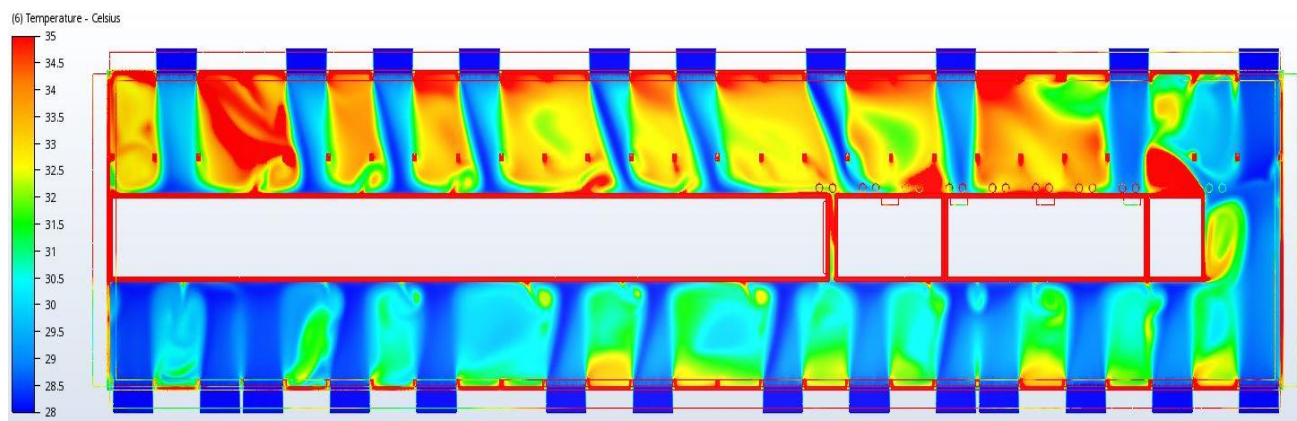
a) Tuloilmalaitteiston muutokset. Ilman nopeus 1,8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s



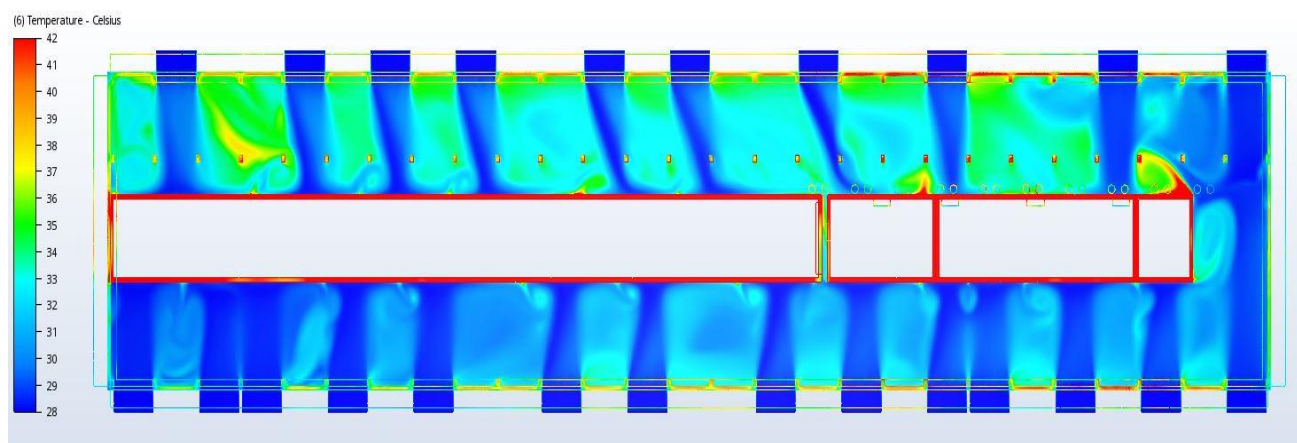
b) Tuloilmalaitteiston muutokset. Ilman nopeus 8 metrissä asteikolla 0–1,2 m/s



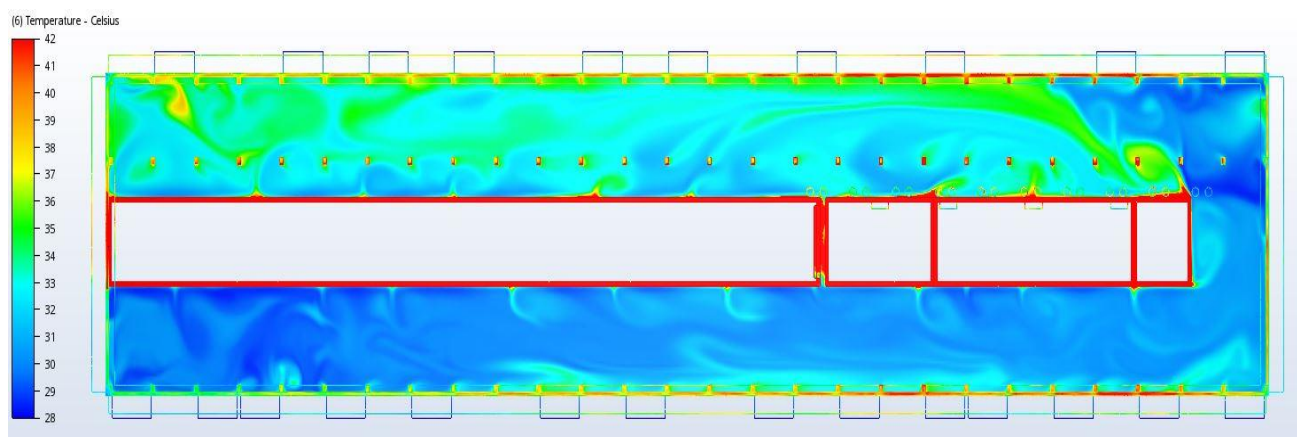
c) Tuloilmalaitteiston muutokset. Ilman nopeus katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 0–1,2 m/s



d) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 28–35 °C

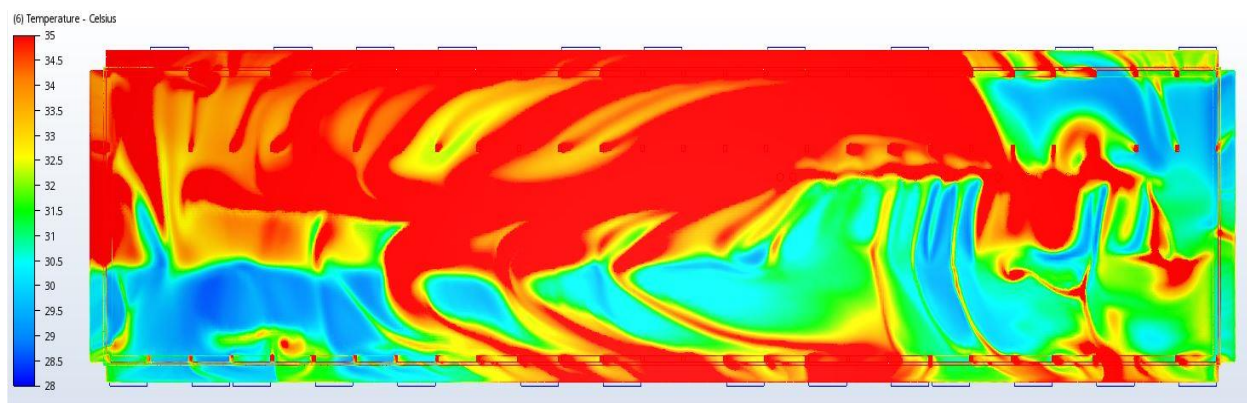


e) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila 1,8 metrissä asteikolla 28–42 °C

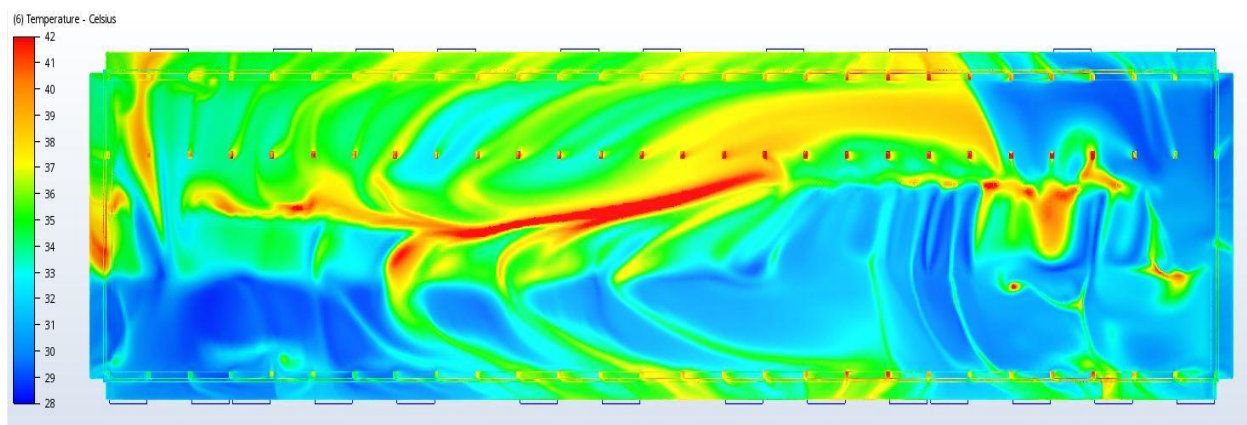


f) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila 8 metrissä asteikolla 28–42 °C

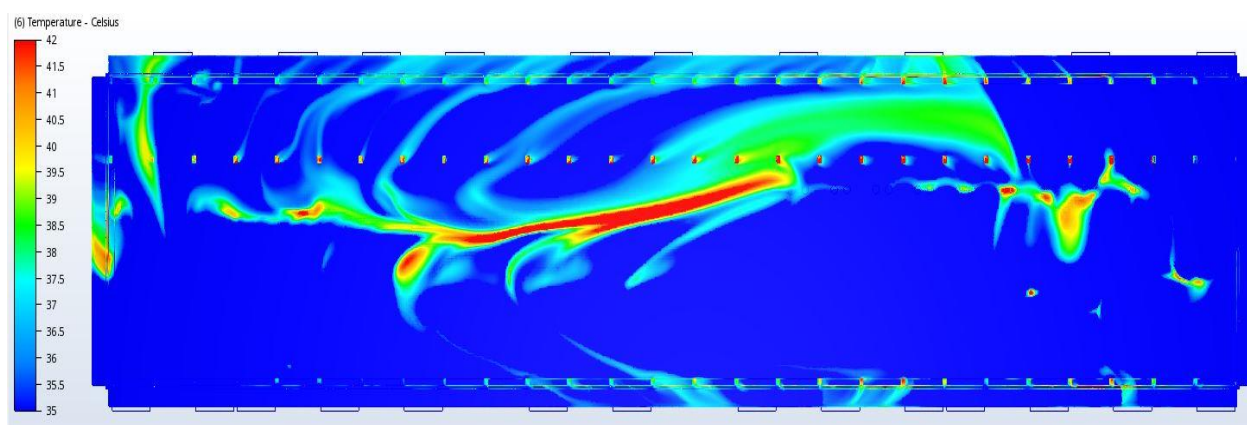




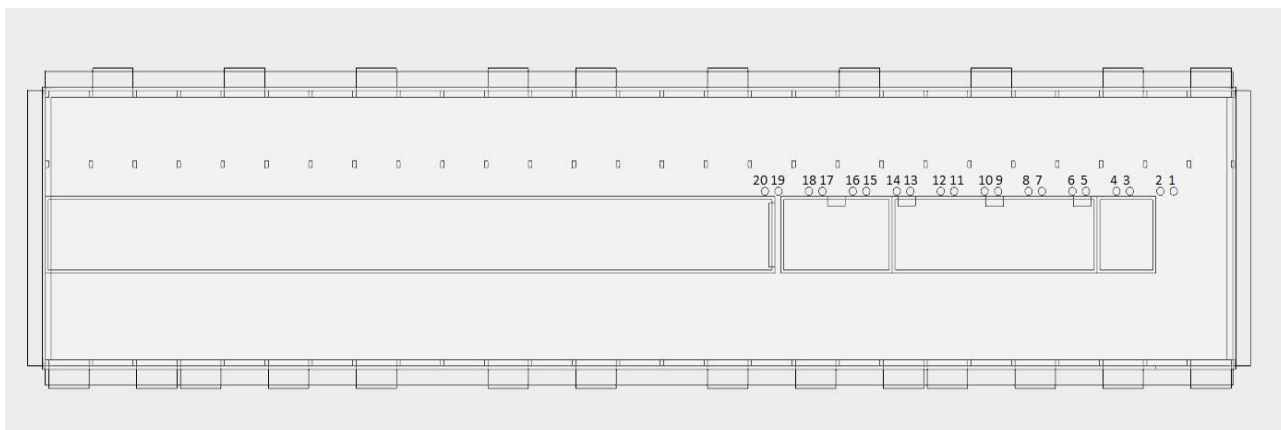
g) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 28–35 °C



h) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 28–42 °C



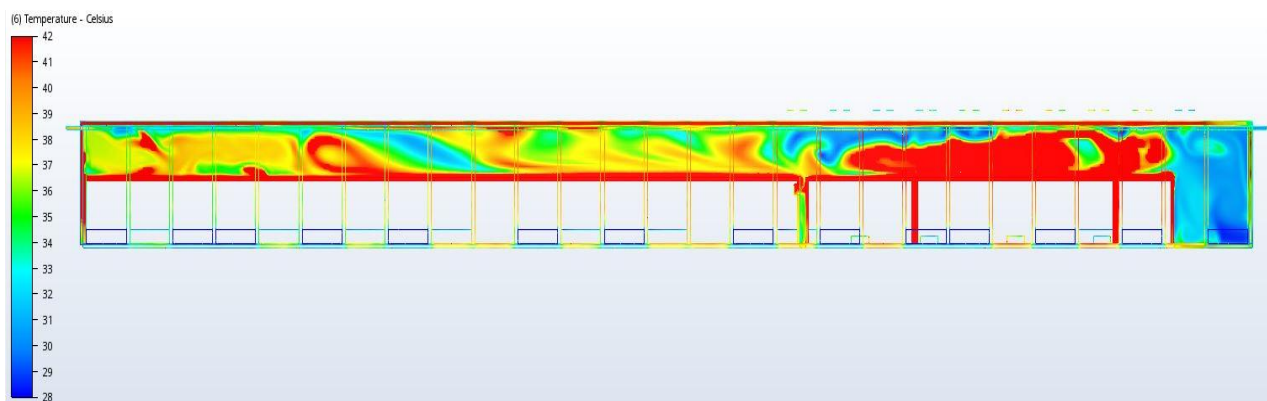
i) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila katonrajassa (15,5 metrissä) asteikolla 35–42 °C



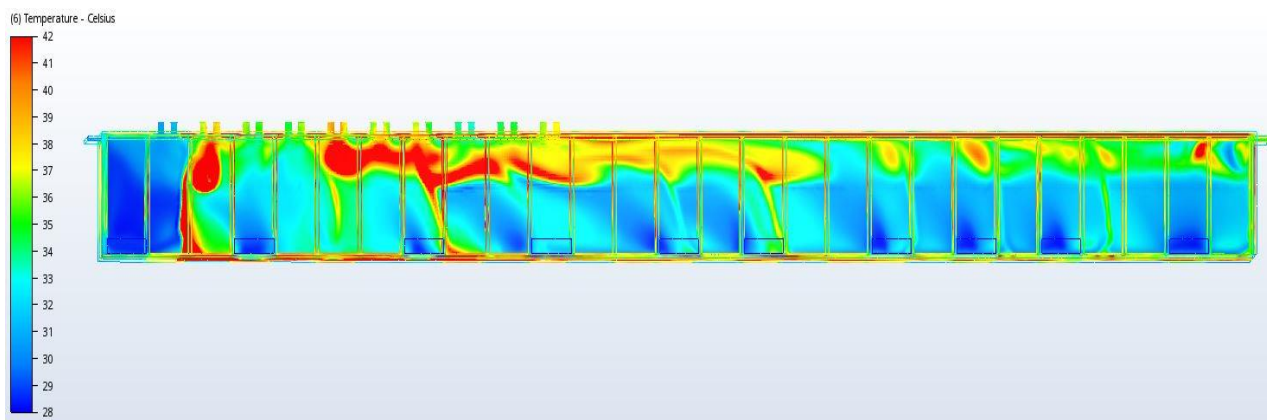
j) Tuloilmalaitteiston muutokset. Numeroidut poistoilma-aukot

NRO	Lämpötila [°C]	NRO	Lämpötila [°C]
1	30,7791	11	39,3004
2	31,461	12	38,6648
3	39,7752	13	38,7908
4	38,4383	14	35,5358
5	36,1317	15	34,443
6	34,6236	16	33,4105
7	34,1016	17	35,757
8	35,6711	18	35,7481
9	42,6602	19	36,8111
10	41,7152	20	36,5045

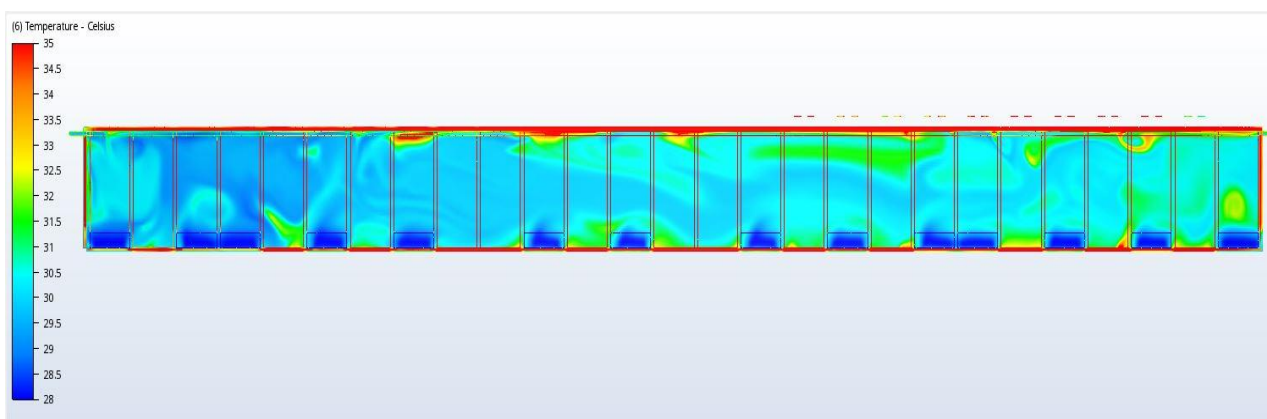
k) Tuloilmalaitteiston muutokset. Poistoilman lämpötila kanavasta salin puoleisesta pinnasta.



l) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila-leikkaus keskeltä salia asteikolla 28–42 °C

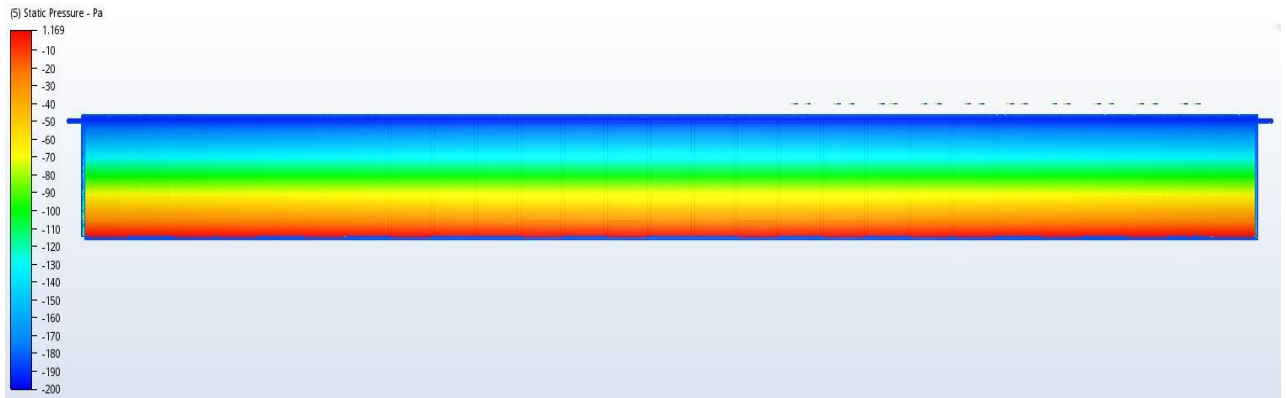


m) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila-leikkaus käyttöpuolelta poistoilmojen kohdalta asteikolla 28–42 °C

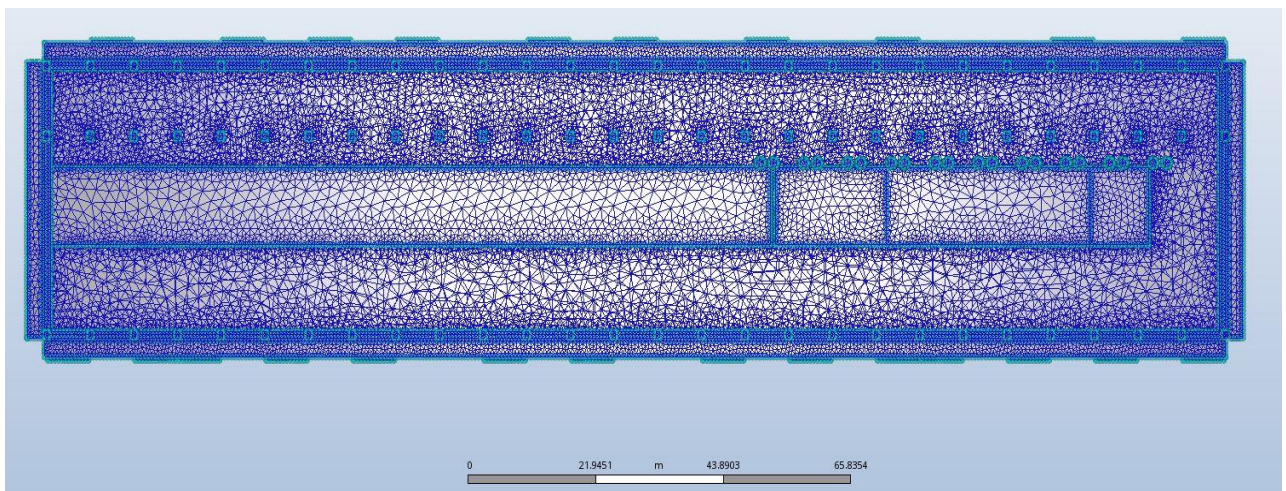


n) Tuloilmalaitteiston muutokset. Lämpötila-leikkaus hoitopuolelta keskeltä käytävää asteikolla 28–35 °C

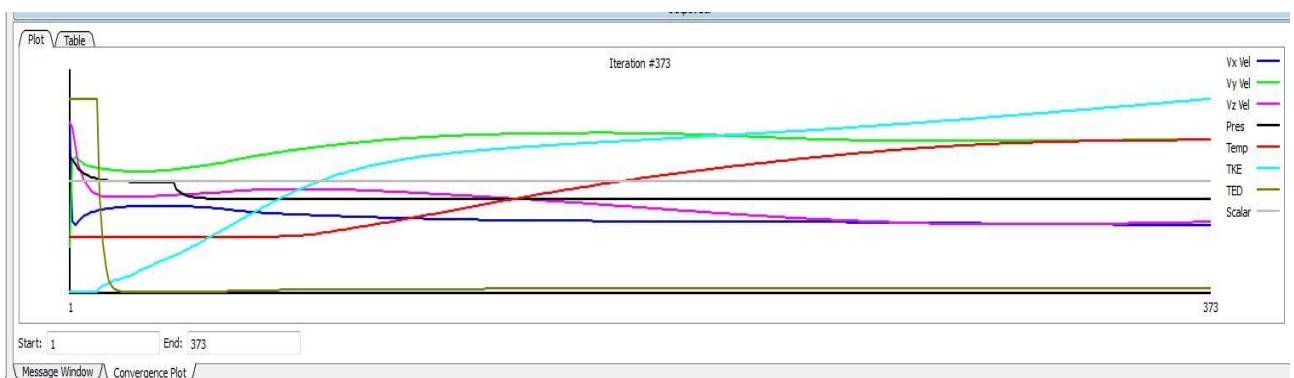




o) Tuloilmalaitteiston muutokset. Salissa vallitseva staattinen paine, leikkaus hoitopuolen käytävän keskeltä. Skaalaus -200...1,169Pa



p) Tuloilmalaitteiston muutokset. Kuva laskentahilasta



q) Tuloilmalaitteiston muutokset. Iterointisuorat.

## **Simuloinneissa eteen tulleet mietteet ja parannukset**

### Tuloilmalaitteet

- Onko ne mallinnettu oikein? Tuloilman suuntaaminen vaikuttaa suuresti nopeuksiin, ja miten se osuu kartonkikoneeseen. Tarkempi tutkimus oikeista laitteista.
- Tuloilmamäärän ja tuloilmakoneiden sijoittelun optimointi
- Miten jet-kanavat vaikuttava lämpötiloihin? Niiden oikea mallintaminen.
- Tuloilmamäärän suhteen tarkentaminen koneen aiheuttamiin lämpö- tai kosteuskuormiin kokonaistaseesta

### Kartonkikone

- Kartonkikoneen aiheuttamat lämpökuormat ja niiden jakautuminen sekä käyttötasolla että kellarissa.
- Mitä muita kuormia käyttötasolla mahdollisesti on.
- Kartonkikoneen tarkempi mallintaminen.

### Kellari

- Kellarin ilmanvaihdon mallintaminen.

### Koko kartonkikonesali

- Miten ilma liikkuu koko salissa?
- Salin tarkempi mallintaminen, miten esim. päällystyskone mallinnetaan?
- Kokonaistase

### Seinät ja muut pinnat

- Mitkä ovat seinien pintalämpötilat?
- Aiheutuuko seinäpintojen läpi esimerkiksi auringon aiheuttamaa lämpökuormaa?
- Välikatto ja sen lämmittäminen

### Vuotoilma ja muu salin geometria

- Onko salin geometria mallinnettu tarpeeksi hyvin?
- Voisiko vuotoilmaa mallintaa jotenkin muuten? Olisiko se mahdollista sisällyttää poistoilmaan? Haittaako vuotoilman mallintaminen "kanavilla" miten paljon laskentaa.

#### Fysiikka ja ratkaiseminen

- Miten lämpökuorma jakaantuu oikeasti saliin ja pinnoille?
- Eri turbulenssimallien kokeileminen, miten ne vaikuttavat tuloksiin
- Eri advektio järjestelmien testaaminen
- Autodeskin automaattisten asetusten tarkempi tutkiminen. Voiko niitä pois ottamalla optimoida laskentaa?

#### Kosteuskuorma

- Haihtumista ei (vielä) tueta Autodesk -ohjelmalla
- Mikäli kosteus määräävä taseen suhteen, miten otetaan huomioon?
- Tuloilmalle ja ilmatilavuudelle voidaan määritellä kosteuspitoisuus
- Ohjelmalla voidaan tutkia kondensoitumista. Milloin kosteus rupeaa tiivistymään pinnoille? Miten tuloilman lämpötila ja kosteus vaikuttavat olosuhteisiin salissa?

#### Laskentaverkko

- Laskentaverkon tihentäminen manuaalisesti, ei pelkästään automaattisilla asetuksilla
- Miten pintojen lähetyvillä olevan verkon tihentäminen vaikuttaa laskentaan?

#### Validointi

- Lämpötila- ja ilmakeuhuus mittaukset salista
- Tuloilmanmäärä ja -lämpötila, poistolle samat
- Miten lähelle tulokset osuvat oikeita olosuhteita?